



André Filipe Afonso Nabais Moreno

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Caracterização reológica de mastiques betuminosos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Luís Manuel Trindade Quaresma
Professor Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologias

Júri:

Presidente: Professora Doutora Ildi Cismasiu

Arguente: Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Vogal: Professor Luís Manuel Trindade Quaresma



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio 2015

“Copyright” de André Filipe Afonso Nabais Moreno, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Luís Quaresma que possibilitou a realização deste trabalho, pela sua orientação, apoio, disponibilidade, confiança, amizade e compreensão ao longo deste processo.

Gostaria de agradecer à empresa ProbiGalp - Ligantes Betuminosos, S.A., pelo fornecimento dos betumes utilizados no âmbito deste trabalho.

Um agradecimento também à Eurocálcio – Calcários e Inertes, S.A., e a Secil pelo fornecimento dos fíleres (calcário e cal hidráulica), utilizados no fabrico dos mastiques betuminosos.

Quero deixar um agradecimento bastante especial ao engenheiro Vítor Silva, pela disponibilidade, boa vontade, amizade e confiança.

Não posso esquecer os amigos e colegas que me acompanharam ao longo deste percurso académico. Com eles aprendi, vivi e desfrutei de grandes momentos. A eles agradeço a amizade, a ajuda, a confiança, o companheirismo e a força que me deram. Em particular gostaria de agradecer à Telma e à Joana que, na fase crítica deste trabalho, estiveram presentes em todos os momentos dando o apoio, ajuda e a motivação necessária para a conclusão do mesmo.

Um agradecimento especial à Rita pela paciência, compreensão, motivação, apoio, amizade e cumplicidade. Por estar sempre perto e me guiar no caminho certo. Agradecer-te não é um gesto que se põe em papel, mas algo que se partilha ao longo da vida.

Por fim, mas não menos importantes, agradeço aos meus pais, à minha irmã e ao meu cunhado pela confiança que sempre depositaram em mim. Muito do que sou devo-lhes, pois passaram-me muitos dos valores necessários para crescer e vingar na vida, tornando-me no homem que sou hoje.

Resumo

A rede rodoviária desempenha um papel fundamental para o desenvolvimento de qualquer país. Atualmente em Portugal tem-se assistido a um aumento do investimento na reabilitação dos pavimentos rodoviários, usualmente recorrendo a colocação de misturas betuminosas.

Constituído por uma parte mais fina do agregado e betume, o mastique é considerado o verdadeiro ligante da mistura betuminosa, uma vez que envolve e liga os agregados grossos, preenchendo deste modo os seus vazios. Assim, é essencial caracterizar o comportamento deste material devido à sua influência em diversas características da mistura betuminosa.

O comportamento viscoelástico do mastique pode ser caracterizado por ensaios com imposição de uma força ou de um deslocamento. No presente trabalho foram realizados ensaios uniaxiais com aplicação de uma deformação uniaxial, quer em ensaios com aumento de comprimento do provete, como em ensaios com redução do comprimento.

Foram utilizados dois tipos de betume, um betume puro e um betume modificado com polímeros. Para além destes, foram utilizados dois tipos de fíler diferentes, um pó de calcário e uma cal hidráulica. Com estes materiais fabricaram-se mastiques betuminosos com diferentes razões fíler/betume e foi avaliado o seu comportamento viscoelástico adaptando a norma EN 12697-26 (2004). Para cada mastique fez-se variar a temperatura, a frequência e a amplitude de deformação imposta.

Para o tratamento dos resultados obtidos nos ensaios utilizou-se um método por regressão linear, para se obter os valores do módulo complexo e do ângulo de fase para cada mastique. Posteriormente, realizou-se o ajustamento dos resultados experimentais com um modelo mecânico 2S2P1D.

Os resultados mostraram que o comportamento dos mastiques é influenciado pelo tipo de ensaio (com aumento ou com redução do comprimento), tipo de fíler e pela relação fíler/betume utilizada.

Palavras-chave: Fíler; Mastique betuminoso; Mistura betuminosa; Ângulo de fase, Módulo complexo.

Abstract

Nowadays the road network plays a significant role for any country's development. In Portugal, there has been a significant increase of the investment in rehabilitation of road pavements in recent years usually using bituminous mixtures.

Resulting a combination of thinner part of the aggregate and bitumen, the mastic is considered to be the true binder for the bituminous mixtures as it involves and binds the coarse aggregates, filling the spaces between particles. This is essential to characterize the mastic's behavior given its importance is various properties of the bituminous mixture.

Mastic's viscoelastic properties can be evaluated using load or displacement controlled tests. In the present work uniaxial tests were performed, either with an increase of the specimen length either with a reduction of its length.

Two types of bitumen, pure and a polymer modified, and two kinds of filler, limestone and an hydraulic limestone were used. Several bituminous mastics were prepared with different filler/bitumen ratios and specimens were tested attending to EN 12697-26 (2004) to evaluate the viscoelastic behavior. Each mastic was tested under different temperature, frequency and imposed deformation amplitude values.

The testing results were processed using a linear regression, procedure to obtain the complex modulus and the phase angle values for each mastic. Afterwards, the experimental results were adjusted with the mechanical model 2S2P1D.

The results proved that the mastic's behavior is influenced by testing procedure (increase or reduction of specimen length), by the type of filler and by the filler/bitumen ratio.

Key-words: Filler; Bituminous mastic; Bituminous mixture; Phase angle; Complex modulus.

Índice

Resumo	I
Abstract.....	III
Índice de figuras	VII
Índice de quadros	XIII
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	XV
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura do trabalho.....	2
2. Reologia	3
2.1. Conceitos gerais	3
2.2. Ângulo de fase e módulo complexo.....	7
2.3. Modelos reológicos	10
2.4. Representação das propriedades reológicas	14
2.4.1. <i>Isócronas</i>	15
2.4.2. <i>Isotérmicas</i>	15
2.4.3. <i>Curvas-mestras</i>	17
2.4.4. <i>Diagramas de Black</i>	20
2.4.5. <i>Diagramas de Cole-Cole</i>	20
3. Mastique betuminoso.....	23
3.1. Definição de mastique betuminoso	23
3.2. Comportamento do fíler	25
3.3. Comportamento mecânico do mastique betuminoso	29
4. Desenvolvimento experimental	33
4.1. Programa de ensaios.....	33
4.2. Caracterização do ligante betuminoso e do fíler	39
4.3. Preparação dos provetes para os ensaios compressão e tração simples	40
4.3.1. <i>Preparação de sub-amostras de betume</i>	40
4.3.2. <i>Fabrico do mastique betuminoso</i>	42
4.3.3. <i>Preparação dos provetes de ensaio</i>	43
4.4. Apresentação e discussão de resultados	45
4.4.1. <i>Influência do tipo de ensaio</i>	45
4.4.2. <i>Influência da amplitude da deformação imposta</i>	47
4.4.3. <i>Influência da temperatura</i>	50

4.4.4.	<i>Influência da razão fíler/betume</i>	52
4.4.5.	<i>Isócronas</i>	53
4.4.6.	<i>Isotérmicas</i>	55
4.4.7.	<i>Curvas-mestras</i>	58
4.4.8.	<i>Diagrama de Black</i>	65
4.5.	Modelação dos resultados experimentais com o modelo 2S2P1D	67
5.	Conclusões	72
5.1.	Considerações finais	72
5.2.	Desenvolvimentos futuros	74
	Referências bibliográficas	76
	Referências normativas	82
	Anexo A – Diagrama total de ensaios	84
	Anexo B – Certificados de qualidade dos betumes	86
	Anexo C – Certificado de qualidade dos fíleres	88
	Anexo D – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase obtidos para mastiques com betume puro 35/50 (P) para o fíler calcário (L) e cal hidráulica (H), para diferentes velocidades, deformações impostas e temperaturas	93
	Anexo E – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase obtidos para mastiques com betume modificado PMB (M) para o fíler calcário (L) e cal hidráulica (H), para diferentes velocidades, deformações impostas e temperaturas	97
	Anexo F – Influência da amplitude de deformação imposta em mastiques ensaiados a 20°C e 25°C, em ensaios de cíclicos uniaxiais de compressão simples	101
	Anexo G – Isócronas do módulo complexo e ângulo de fase de mastiques à frequência de 0,1 Hz.	105
	Anexo H – Isotérmicas do módulo complexo e do ângulo de fase de diferentes mastiques à temperatura de 25°C	107
	Anexo I – Curvas-mestras do módulo complexo e do ângulo de fase de diferentes mastiques com temperatura de referência de 25°C	109
	Anexo J – Curvas-mestras do ajustamento do modelo 2S2P1D aos resultados experimentais para o módulo complexo e ângulo de fase de diferentes mastiques com temperatura de referência de 25°C	117

Índice de figuras

Figura 1.1 – Composição de amostra de mistura betuminosa.....	1
Figura 2.1 – Representação esquemática do escoamento de um fluido entre duas placas paralelas.....	4
Figura 2.2 – Esquema da classificação reológica de fluidos	4
Figura 2.3 – Comportamento reológico dos materiais Newtonianos.	5
Figura 2.4 – Representação esquemática de alguns comportamentos não-newtoniana	5
Figura 2.5 – Resposta de um material viscoelástico a uma tensão constante aplicada no intervalo de tempo entre t_1 e t_2	6
Figura 2.6 – Ábaco de Van der Poel para a determinação da rigidez do betume	7
Figura 2.7 - Relação tensão-deformação durante um ensaio cíclico uniaxial de carga sinusoidal	8
Figura 2.8 – Relação entre E^* , E_1 , E_2 e ϕ	9
Figura 2.9 - Modelos Reológicos: (a) de Maxwell, (b) de Kelvin e (c) de Burgers.	11
Figura 2.10 – Comportamento do modelo de Maxwell, Kelvin e Burgers para uma tensão constante durante o intervalo de tempo ($t_0 - t_1$).....	12
Figura 2.11 - Modelos reológicos de Huet (a), de Huet Sayegh (b) e 2S2P1D (c).....	12
Figura 2.12 - Exemplo de isócrona do módulo complexo de misturas betuminosas submetidas a uma frequência de 10 Hz	15
Figura 2.13 – Exemplo de isócrona de ângulo de fase de misturas betuminosas submetidas a uma frequência de 10 Hz	15
Figura 2.14 - Exemplo de isotérmica do ângulo de fase de mastiques betuminosos submetidas a uma temperatura de 20°C	16
Figura 2.15 Exemplo de isotérmica do ângulo de fase de mastiques betuminosos submetidas a uma temperatura de 20°C	16
Figura 2.16 - Exemplo de aplicação do princípio da sobreposição tempo-temperatura para a construção de uma curva-mestra correspondente ao módulo complexo	17
Figura 2.17 – Exemplo de curva-mestra do módulo complexo, com $T_{ref} = 15^\circ \text{C}$, para betume puro 50/70 e três mastiques com diferentes tipos de fíler.....	19
Figura 2.18 - Exemplo de curva-mestra do ângulo de fase, com $T_{ref} = 15^\circ \text{C}$, para betume puro 50/70 e três mastiques com diferentes tipos de fíler.....	19
Figura 2.19 - Exemplo de um diagrama de Black de mastiques com betume puro 100/150 e com fíler de cimento, calcário e arenito.....	20
Figura 2.20 – Exemplo de um diagrama de Cole-Cole	21
Figura 3.1 – Composição de mistura betuminosas e do mastic betuminoso	23
Figura 3.2 - Diagrama esquemático ilustrativo da ocupação dos vazios do fíler pelo betume	25
Figura 3.3 - Índice de vazios, em percentagem, de alguns tipos de fíler.....	26
Figura 3.4 – Modelo esquemático para quantificar a o efeito do fíler do ligante (adaptado de Faheem e Bahia, 2009).	27
Figura 4.1 - Esquema de ensaios: ensaio cíclico de compressão simples (a), posição inicial do provete (b), ensaio cíclico de tração simples (c)	34
Figura 4.2 – Provete de mastic betuminoso durante um ensaio de compressão simples a 35°C.....	34
Figura 4.3 – Ensaios do mastic a 20 °C (a) e 25°C (b), o mecanismo de ensaio (Zwick) e a câmara de aquecimento para controlo de temperatura.	36
Figura 4.4 - Exemplo de uma regressão linear tempo/força para o mastic M 1,5 H 0,1 25 C 0,08.	37

Figura 4.5 - Exemplo de um gráfico deslocamento/força para o mastique M 1,5 H 0,1 25 C 0,08, após regressão linear.	38
Figura 4.6 – Diagrama parcial com os tipos de betume, fíler e razões fíler/betume utilizado e as diversas combinações.	38
Figura 4.7 – Fíler de cal hidráulica (NHL5) e de calcário (RC480).	40
Figura 4.8 – Sub-amostras em latas grandes, médias e pequenas de betume modificado (PMB 45/80-65) e betume puro (35/50).	41
Figura 4.9 – Fases do processo de fabrico do mastique betuminoso: a) fase inicial, onde é introduzido fíler calcário ao betume puro e (b) fase intermédia, onde se inicia a mistura do betume e do fíler.	42
Figura 4.10 – Fase final do processo de fabrico do mastique betuminoso, onde é obtida uma mistura homogeneizada.	43
Figura 4.11 - Materiais utilizados na preparação dos provetes: (a) molde cilíndrico metálico e (b) molde cilíndrico metálico a ser preenchido por mastique betuminoso.	44
Figura 4.12 – Materiais utilizados na preparação dos provetes para ensaio: (a) suporte metálico onde o provete é colado e ensaiado (b) cola Araldite utilizada para colagem dos provetes.	44
Figura 4.13 – Efeito do tipo de ensaio cíclico uniaxial no valor do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L).	45
Figura 4.14 - Efeito do tipo de ensaio cíclico uniaxial no valor do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).	46
Figura 4.15 - Efeito do tipo de ensaio cíclico uniaxial no valor do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).	46
Figura 4.16 - Efeito do tipo de ensaio cíclico uniaxial no valor do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H).	47
Figura 4.17 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 20°C, com razão f/b de 1,5 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	48
Figura 4.18 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 25°C, com razão f/b de 1,5 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	48
Figura 4.19– Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 20°C, com razão f/b de 1,5 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	49
Figura 4.20 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 25°C, com razão f/b de 1,5 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	49
Figura 4.21 - Efeito da temperatura no módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L).	50
Figura 4.22 - Efeito da temperatura no valor do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).	50
Figura 4.23 - Efeito da temperatura no valor do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).	51
Figura 4.24 - Efeito da temperatura no valor do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H).	51
Figura 4.25 – Evolução do valor do módulo complexo para mastiques betuminosos com betume puro (P), à frequência de 0,1 Hz e a 25°C.	52
Figura 4.26– Evolução do valor do módulo complexo para mastiques betuminosos com betume modificado (M), à frequência de 0,1 Hz e a 25°C.	53
Figura 4.27 – Isócronas do módulo complexo a 0,1 Hz para os mastiques, com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).	54

Figura 4.28– Isócronas do módulo complexo a 0,1 Hz, para os mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).	54
Figura 4.29 - Isócronas do ângulo de fase a 0,1 Hz, para os mastiques com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).	54
Figura 4.30 - Isócronas do ângulo de fase a 0,1 Hz, para os mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).	55
Figura 4.31 – Isotérmicas do módulo complexo para os mastiques com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H), a 25°C.	56
Figura 4.32 – Isotérmicas do módulo complexo para os mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L), a 25°C.	56
Figura 4.33 – Isotérmicas do ângulo de fase para os mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), a 25°C.	57
Figura 4.34 – Isotérmicas do ângulo de fase para os mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L), a 25°C.	57
Figura 4.35 – Variação dos fatores de deslocamento com a temperatura, tendo como temperatura de referência de 25°C.	58
Figura 4.36 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,32.	59
Figura 4.37 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,32.	59
Figura 4.38 – Curvas-mestra do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,32.	60
Figura 4.39 – Curvas-mestra do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,32.	60
Figura 4.40 – Curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) pó de calcário (L) para uma temperatura de referência de 25°C.	61
Figura 4.41 – Curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) pó de calcário (L) para uma temperatura de referência de 25°C.	61
Figura 4.42 – Curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) fíler de cal hidráulica (H) para uma temperatura de referência de 25°C.	62
Figura 4.43 – Curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) fíler de cal hidráulica (H) para uma temperatura de referência de 25°C.	62
Figura 4.44 – Curvas-mestras do ângulo de fase dos mastiques com betume puro (P) pó de calcário (L) para uma temperatura de referência de 25°C.	63
Figura 4.45 – Curvas-mestras do ângulo de fase dos mastiques com betume modificado (M) pó de calcário (L) para uma temperatura de referência de 25°C.	63
Figura 4.46 – Curvas-mestras do ângulo de fase dos mastiques com betume puro (P) fíler de cal hidráulica (H) para uma temperatura de referência de 25°C.	63
Figura 4.47 – Curvas-mestras do ângulo de fase dos mastiques com betume modificado (M) fíler de cal hidráulica (H) para uma temperatura de referência de 25°C.	64
Figura 4.48 - Diagramas de Black dos mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L).	65
Figura 4.49 - Diagramas de Black dos mastiques com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).	65
Figura 4.50 - Diagramas de Black dos mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).	66
Figura 4.51 - Diagramas de Black dos mastiques com betume puro (M) e fíler de cal hidráulica (H).	66
Figura 4.52 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mastique com betume puro (P) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	68
Figura 4.53 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	68

Figura 4.54 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mastique com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.	69
Figura 4.55 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mastique com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.	69
Figura 4.56 - Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume puro (P) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	70
Figura 4.57 - Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (M) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	70
Figura 4.58 - Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.	71
Figura 4.59 - Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.	71
Figura A.1 – Diagrama total de ensaios.	84
Figura B.1 – Certificado de qualidade do betume puro 35/50.	86
Figura B.2 – Certificado de qualidade do betume modificado PMB 45/80-65	87
Figura C.1 - Certificado de qualidade do fíler cal hidráulica (NHL5).	88
Figura C.2- Certificado de qualidade do fíler calcário (RC480).	89
Figura C.3- Certificado de qualidade do fíler calcário (RC480) - IVR	91
Figura C.4 - Certificado de qualidade do fíler calcário (RC480) – Distribuição granulométrica.	92
Figura F.1 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 20°C, com razão f/b de 1 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	101
Figura F.2 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 25°C, com razão f/b de 1e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	101
Figura F.3 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 20°C, com razão f/b de 1,32 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	102
Figura F.4 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 25°C, com razão f/b de 1,32 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	102
Figura F.5 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 20°C, com razão f/b de 1 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	103
Figura F.6 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 25°C, com razão f/b de 1 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	103
Figura F.7 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 20°C, com razão f/b de 1,32 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	104
Figura F.8 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 25°C, com razão f/b de 1,32 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).	104
Figura G.1 – Isócronas do módulo complexo a 0,1 Hz para os mastiques, com betume puro (P) e pó de calcário (L).	105
Figura G.2 – Isócronas do módulo complexo a 0,1 Hz para os mastiques, com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H).	105
Figura G.3 – Isócronas do ângulo de fase a 0,1 Hz para os mastiques, com betume puro (P) e pó de calcário (L).	106

Figura G.4 – Isócronas do ângulo de fase a 0,1 Hz para os mastiques, com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H).....	106
Figura H.1 - Isotérmicas do módulo complexo para os mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L), a 25°C.	107
Figura H.2 - Isotérmicas do módulo complexo para os mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), a 25°C.....	107
Figura H.3 - Isotérmicas do ângulo de fase para os mastiques com betume puro (P) e fíler de calcário (L), a 25°C.	108
Figura H.4 - Isotérmicas do ângulo de fase para os mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), a 25°C.....	108
Figura I.1– Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1.....	109
Figura I.2 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1,5.....	109
Figura I.3– Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1.	109
Figura I.4– Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,32.	110
Figura I.5 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,5.	110
Figura I.6– Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1.....	110
Figura I.7 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1,32.....	111
Figura I.8 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1,5.....	111
Figura I.9 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1.....	111
Figura I.10 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,5.	112
Figura I.11– Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1.....	112
Figura I.12 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1,5.....	112
Figura I.13 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1.	113
Figura I.14 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,32.	113
Figura I.15 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,5.	113
Figura I.16 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1.....	114
Figura I.17 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1,32.....	114
Figura I.18 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de calcário (L) e com razão f/b de 1,5.....	114
Figura I.19 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1.....	115

Figura I.20 – Curvas-mestras do ângulo de fase do masticque betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,5.	115
Figura J.1 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume puro (P) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.	117
Figura J.2 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume puro (P) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	117
Figura J.3 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.	118
Figura J.4 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	118
Figura J.5 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume modificado (M) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	118
Figura J.6 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume modificado (M) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	119
Figura J.7 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume modificado (M) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	119
Figura J.8 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume modificado (M) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	119
Figura J.9 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	120
Figura J.10 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um masticque com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	120
Figura J.11 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um masticque com betume puro (P) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.	120
Figura J.12 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um masticque com betume puro (P) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	121
Figura J.13 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um masticque com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.	121
Figura J.14 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um masticque com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	121
Figura J.15 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um masticque com betume modificado (M) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	122
Figura J.16 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um masticque com betume modificado (M) e fíler de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	122
Figura J.17 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um masticque com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.	122
Figura J.18 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um masticque com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.	123

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Funções dos parâmetros h , k , α e β (Yussof , 2012).....	13
Quadro 3.1 – Evolução das especificações do fíler para as misturas betuminosas.....	29
Quadro 3.2 - Evolução das especificações da relação fíler/betume para as misturas betuminosas.....	31
Quadro 3.3 – Resumo de valores das constantes do modelo 2S2P1D relativas aos mastiques betuminosos.	31
Quadro 4.1 – Síntese de todos os parâmetros e siglas.	35
Quadro 4.2 - Principais propriedades dos betumes utilizados no fabrico dos mastiques betuminosos. ...	39
Quadro 4.3 – Principais características dos fíleres utilizados no fabrico dos mastiques betuminosos. ...	39
Quadro D.1 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e fíler de calcário (L), com razão f/b de 1.	93
Quadro D.2 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e fíler de calcário (L), com razão f/b de 1,32.	93
Quadro D.3 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e fíler de calcário (L), com razão f/b de 1,5.	94
Quadro D.4 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1.....	94
Quadro D.5 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1,32.....	95
Quadro D.6 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1,5.....	95
Quadro E.1 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e fíler de calcário (L), com razão f/b de 1.	97
Quadro E.2 Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e fíler de calcário (L), com razão f/b de 1,32.....	97
Quadro E.3 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e fíler de calcário (L), com razão f/b de 1,5.....	98
Quadro E.4 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1.....	98
Quadro E.5 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1,32.....	99
Quadro E.6 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1,5.....	99

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

2S2P1D	Designação genérica do modelo de Huet-Sayegh modificado (<i>2 springs, 2 parabolic creep elements and 1 dashpot</i>)
BRRC	Centro de Investigação Rodoviário Belga (<i>Belgian Road Research Centre</i>)
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DSR	Reómetro de corte dinâmico (<i>Dynamic Shear Rheometer</i>)
EN	Norma europeia (<i>European Norm</i>)
EP	Estradas de Portugal
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
IPQ	Instituto Português da Qualidade
IVR	Índice de vazios de Rigden
JAE	Junta Autónoma de Estradas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEV	Microscópio eletrónico de varrimento
NCHRP	Programa nacional cooperativo de pesquisa rodoviária (<i>National Cooperative Highway Research Program</i>)
NP	Norma portuguesa
PMB	Betume modificado c/ polímeros (<i>Polymer Modified Bitumen</i>)
PTTSP	Princípio da sobreposição parcial de tempo-temperatura (<i>Partial Time-Temperature Superposition Principle</i>)
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno (<i>Styrene Butadiene Styrene</i>)
TTSP	Princípio da sobreposição tempo-temperatura (<i>Time-Temperature Superposition Principle</i>)
UNL	Universidade Nova de Lisboa
VAM	Valor de azul de metileno
VMA	Vazios no agregado mineral (<i>Voids in Mineral Aggregate</i>)
VST	Suscetibilidade da viscosidade à temperatura (<i>Viscosity Temperature Susceptibility</i>)

Letras Romanas

A	Área da secção transversal
a_t	Fator de deslocamento horizontal
C_v	Concentração crítica
C_1	Constante da equação de Wiliam, Landel e Ferry
C_2	Constante da equação de Wiliam, Landel e Ferry
E	Módulo de elasticidade ou de Young
E^*	Módulo complexo

E_{∞}	Módulo complexo quando a frequência tende para infinito
E_0	Módulo complexo quando a frequência tende para zero
E_1	Componente real do módulo complexo (módulo conservativo)
E_2	Componente imaginária do módulo complexo (módulo dissipativo)
E_m	Módulo de elasticidade da mola de Maxwell
E_k	Módulo de elasticidade da mola de Kelvin
F	Força normal
f	Frequência
f_r	Frequência equivalente
G^*	Módulo complexo de corte
h	Afastamento entre placas ou constante do modelo 2S2P1D
i	Unidade imaginária
K	Rigidez da mola
k	Constante do modelo 2S2P1D
n	Número total de valores do ensaio
P	Peso
R^2	Coeficiente de determinação
T	Temperatura
T_{ab}	Temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola
T_{ref}	Temperatura de referência
T_1	Tempo de relaxação
T_2	Tempo de atraso
t	Tempo
t_i	Tempo de cada valor de ensaio
V	Volume
v	Velocidade

Letras Gregas

α	Constante do modelo do modelo 2S2P1D
β	Constante do modelo do modelo 2S2P1D
$\dot{\gamma}$	Taxa de corte
γ_e	Deformação elástica
γ_v	Deformação viscosa
γ_{ve}	Deformação viscoelástica
ΔT_{ab}	Temperatura de amolecimento pelo método anel e bola
ε	Deformação linear longitudinal

η_1	Coeficiente de viscosidade do amortecedor de Maxwell
η_2	Coeficiente de viscosidade do amortecedor de Kelvin
λ	Constante do modelo 2S2P1D, também designado por tempo característico
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Massa volúmica
σ	Tensão normal
τ	Tensão de corte
φ	Ângulo de fase
ω	Amplitude da frequência angular

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

Em Portugal, os pavimentos flexíveis são os mais utilizados. Estes apresentam na sua constituição nas camadas superiores (camada de desgaste, camada de ligação e por vezes camada base) misturas betuminosas e nas camadas inferiores materiais granulares. As misturas betuminosas são compostas por ar, ligante betuminoso e um conjunto de agregados (doseados de uma forma volumétrica ou ponderal), como indicado na Figura 1.1 (Branco *et al.*, 2011).

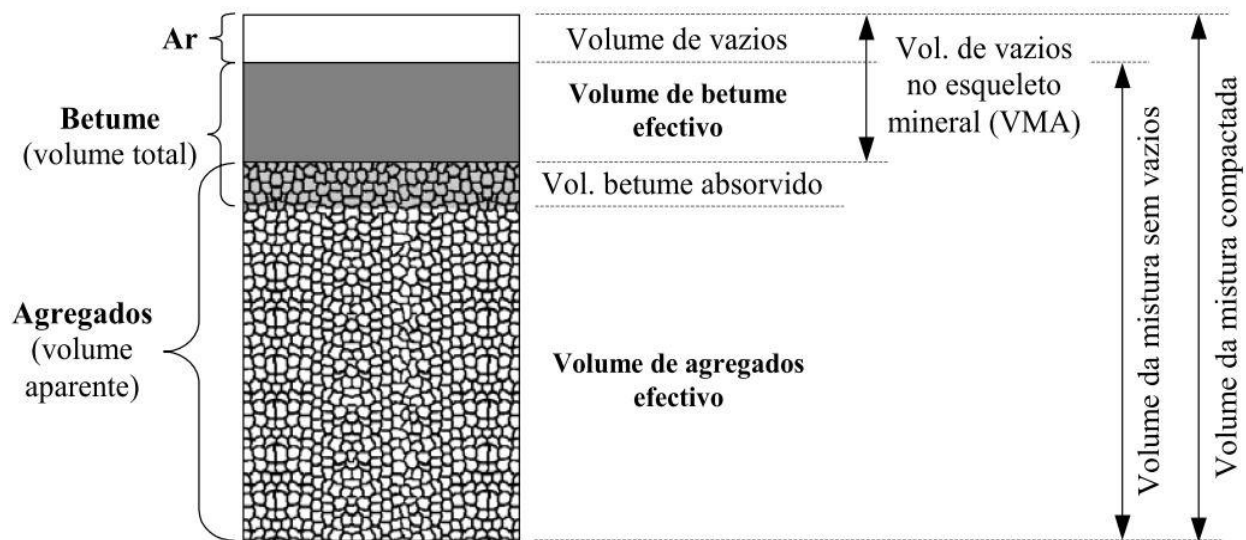


Figura 1.1 – Composição de amostra de mistura betuminosa (Silva, 2005).

O agregado é constituído por agregados grossos, agregados finos e fíler.

Segundo a NP EN 13043 (2010) define-se por agregados finos todos os agregados com dimensão inferior a 2 mm, sendo o fíler o agregado cuja maior parte passa no peneiro com malha de 0,063 mm. Assim todo o agregado com dimensão superior a 2 mm é considerado agregado grosso.

O betume tem como sua função principal envolver as partículas de agregado grosso, assegurando propriedades essenciais como estabilidade, flexibilidade, durabilidade, resistência à fadiga, impermeabilidade, trabalhabilidade e compacidade (Bardini *et al.*, 2009). Os betumes puros e modificados, em conjunto com o agregado fino, originam o mastique betuminoso. O fíler ao atuar como parte ativa do mastique, altera as características dos ligantes betuminosos e preenche os vazios entre os agregados graúdos nas misturas. Na dosagem, a lubrificação das partículas de agregados maiores, as características de compactação e o teor ótimo de ligante são influenciados pelo mastique. A sua qualidade afeta não só a trabalhabilidade mas também as respostas mecânicas das misturas betuminosas (Bardini *et al.*, 2009; Matos, 2012; Santos, 2011).

A caracterização reológica do betume é frequentemente realizada através do reómetro de corte dinâmico (DSR). A mesma metodologia de caracterização pode ser utilizada para mastiques. Para misturas betuminosas com agregados grossos já não se consegue realizar a caracterização da sua

reologia com o reómetro de corte dinâmico. Para este efeito recorre-se normalmente a ensaios com provetes de maiores dimensões à flexão, compressão, tração simples e compressão diametral.

Considera-se pois importante complementar a caracterização de mastiques betuminosos pelo reómetro de corte dinâmico com ensaios sobre provetes de maior dimensão que possam também ser utilizados na compreensão do comportamento de misturas betuminosas que incluam partículas de maiores dimensões.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar reologicamente mastiques betuminosos, através de ensaios com repetida aplicação de uma variação de comprimento do provete dentro de determinadas temperaturas a que o material é sujeito. Assim, para uma dada gama de frequências de aplicação e para uma deformação uniaxial imposta no material, obtém-se o módulo complexo e o ângulo de fase que representam o comportamento viscoelástico.

De modo a cumprir a este objetivo foram fabricados vários tipos de mastique betuminoso onde foram utilizados dois betumes e dois tipos de fíler.

1.3. Estrutura do trabalho

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos.

No capítulo 1 é descrito o enquadramento do tema, os objetivos da dissertação e a respetiva organização.

O capítulo 2 é dedicado aos conceitos fundamentais da reologia, necessários para a compreensão dos betumes e dos mastiques betuminosos. Apresentam-se os parâmetros de caracterização do seu comportamento viscoelástico e alguns modelos reológicos capazes de o descrever. Ainda são expostas as representações mais usuais das propriedades reológicas.

O capítulo 3 aborda as características dos mastiques betuminosos, o comportamento do fíler no mastique e o comportamento mecânico do mastique.

No capítulo 4 é descrito o programa experimental desenvolvido. É descrita a metodologia utilizada, os materiais utilizados, o processo de fabrico dos provetes e as condições de ensaio. Também são apresentados e discutidos os resultados de caracterização dos mastiques betuminosos.

Por fim, o capítulo 5 refere-se às conclusões sobre os resultados obtidos, bem como, algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos e aplicações futuras do material estudado.

2. Reologia

2.1. Conceitos gerais

O termo reologia é originário do grego *rhéos* (fluxo) e *lógos* (estudo). Assim, a reologia é a ciência que estuda o escoamento do fluxo ou a deformação de um corpo sob a ação de uma força ou tensão. Introduzido pelo Professor Eugene Cook Bingham, esta ciência abrange o estudo de vários materiais desde os sólidos elásticos até aos líquidos ou fluídos viscosos, sendo que a viscosidade, elasticidade e plasticidade são as propriedades mais importantes (Mothé *et al.*, 2006).

No séc. XVII, Robert Hooke desenvolveu a lei que abrange a teoria da elasticidade e é utilizada para descrever o comportamento em que a deformação é proporcional à força que a produziu e quando esta é retirada a deformação desaparece de imediato. Mais tarde, no início do século XIX, o comportamento dos materiais elásticos foi expresso por Young em termos de tensões e extensões podendo traduzir-se matematicamente pela equação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

em que σ representa a tensão normal (Pa), E é o módulo de elasticidade ou de Young (Pa) e ε é a deformação linear longitudinal ou extensão resultante (adimensional). A tensão normal é calculada através da equação:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

onde F é uma força normal (N) e A é a área da secção transversal (m²).

Após sofrer uma dada deformação devido à aplicação de uma carga, um material puramente elástico consegue recuperar totalmente a sua configuração inicial, sofrendo uma deformação reversível.

Para o estudo dos líquidos ou fluídos, Issac Newton desenvolveu a lei de Newton com a seguinte definição: “a resistência resultante do atrito interno entre as partes do líquido, em condições iguais, é proporcional à velocidade com que as partes do líquido são separadas entre si”. Ao atrito entre as “partes” do líquido dá-se o nome de viscosidade (Barnes *et al.*, 1989).

Conforme ilustrado na Figura 2.1, tendo um líquido contido entre duas placas paralelas entre si com área A , separadas à distância h e considerando que a placa inferior é fixa, a placa superior move-se com uma velocidade v , devido à aplicação de uma força F . A aplicação dessa força provoca uma resistência interna ao fluxo/corte. Quanto maior for essa resistência, maior será a força F necessária para causar o movimento do líquido, ou seja, maior será a força de corte.

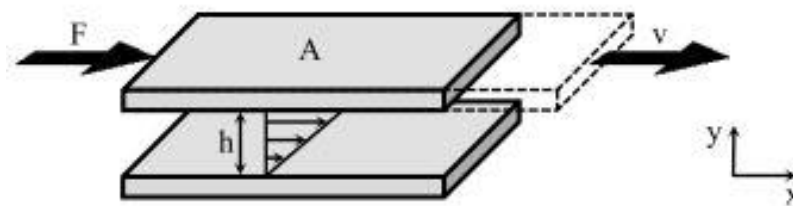


Figura 2.1 – Representação esquemática do escoamento de um fluido entre duas placas paralelas (adaptado de Barnes *et al.*, 1989).

Em suma, a lei de Newton pode ser apresentada através da seguinte equação matemática:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

em que a tensão de corte (τ) é diretamente proporcional à taxa de corte em s^{-1} ($\dot{\gamma}$), sendo a constante de proporcionalidade (η) o coeficiente de viscosidade, em Pa.s. A temperatura, a pressão, o tempo de carregamento e a taxa de corte, são parâmetros que influenciam a viscosidade dos materiais, definindo o comportamento dos mesmos (Barnes, Hutton, & Walters, 1989).

Os fluidos podem ser divididos em dois grandes grupos: os ideais e os reais. Os ideais são os que possuem viscosidade igual a zero, não tendo nenhum atrito entre as partículas. Os reais estão divididos em newtonianos e não-newtonianos. Na Figura 2.2 é apresentado um esquema com a classificação reológica de fluidos.

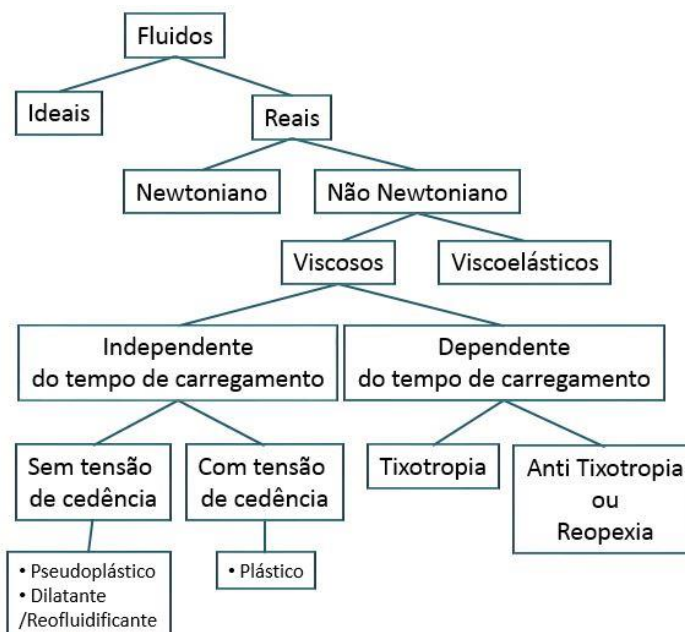


Figura 2.2 – Esquema da classificação reológica de fluidos (adaptado de Santos, 2001).

Na Figura 2.3 pode-se observar, graficamente, o comportamento de um material newtoniano. Ao longo do tempo, a viscosidade é constante e existe uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de corte. Relativamente aos não-newtonianos, a viscosidade varia com a taxa de corte (Mothé, Correia, Petri, Mothé, & Carestiatto) (Barnes, Hutton, & Walters, 1989).

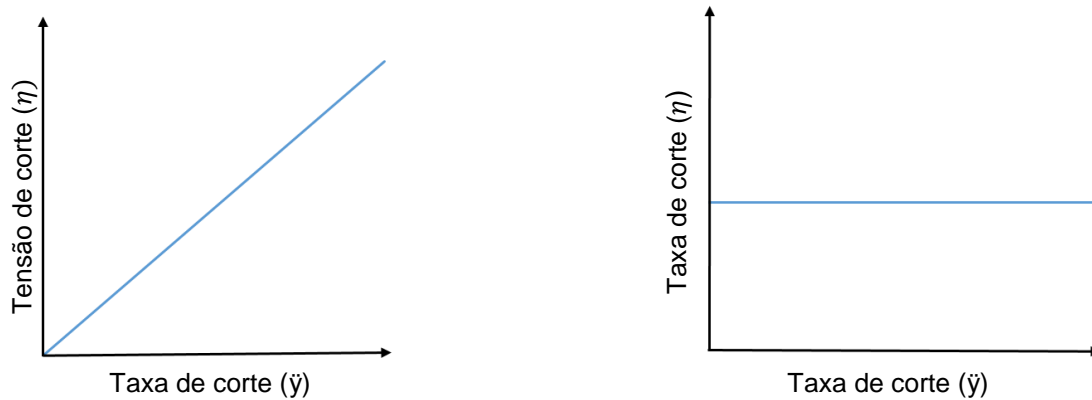


Figura 2.3 – Comportamento reológico dos materiais Newtonianos (adaptado de Matos, 2012).

Como é possível visualizar no esquema da Figura 2.2, o comportamento dos materiais não-newtonianos pode ou não depender do tempo de carregamento. No caso de haver uma dependência, podem apresentar dois tipos de comportamento:

- Tixotrópico, material que exibe uma diminuição gradual da viscosidade ao longo do tempo de carregamento;
- Anti-Tixotrópico/Reopexia, material que exibe um aumento gradual da viscosidade ao longo do tempo de carregamento, sendo o oposto de tixotrópico.

No caso de o comportamento ser independente do tempo de carregamento e não possuir tensão de cedência, os materiais podem-se distinguir em dois tipos: os pseudoplásticos, também designados *shear-thinning* e os dilatantes/reofluidificantes ou *shear-thickening*. Ambos os comportamentos dependem da taxa de corte, sendo que no primeiro a sua viscosidade aumenta com o aumento da taxa de corte e o segundo tem o comportamento oposto (Barnes *et al.*, 1989).

Assim, na

Figura 2.4 é apresentada uma representação esquemática de alguns comportamentos Não-Newtonianos.

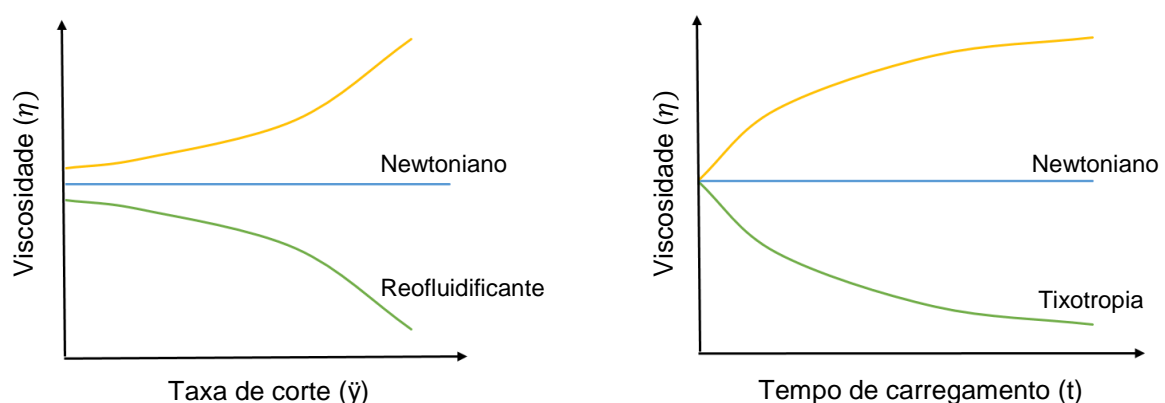


Figura 2.4 – Representação esquemática de alguns comportamentos não-newtonianos (adaptado de Pereira, 2014).

Contudo, ao longo dos anos vários autores concluíram que alguns materiais apresentavam um comportamento com propriedades elásticas e viscosas, levando à necessidade de definir a viscoelasticidade dos mesmos (Barnes *et al.*, 1989).

Através da Figura 2.5, onde é apresentada a resposta de um material viscoelástico, é possível visualizar que, ao retirar a tensão constante aplicada, parte da deformação é recuperável. Com o decorrer do tempo, esta deformação mantém-se constante (Pereira, 2014).

De salientar, que a velocidade de aplicação da força é essencial para compreender o comportamento do material, pois se esta for lenta, irá apresentar um aspeto viscoso, caso contrário, se for mais rápida terá um comportamento elástico.

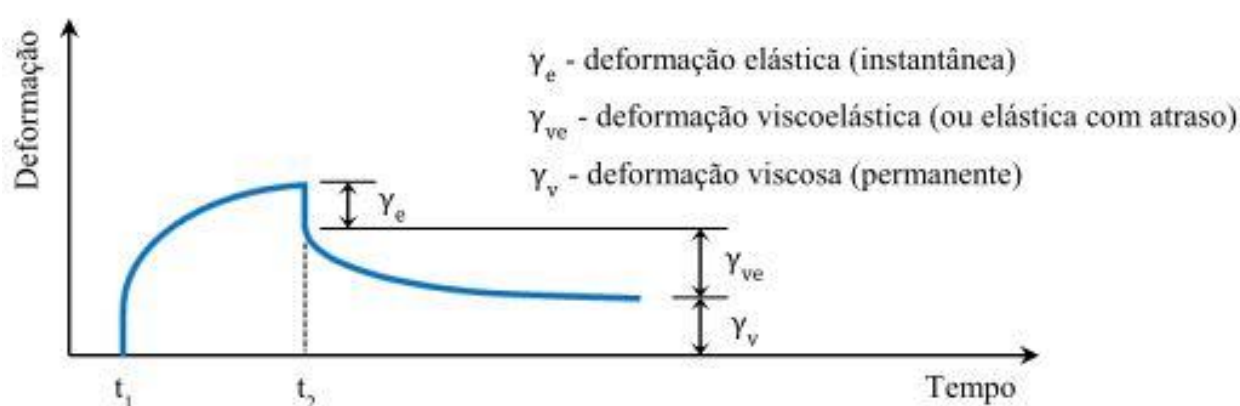


Figura 2.5 – Resposta de um material viscoelástico a uma tensão constante aplicada no intervalo de tempo entre t_1 e t_2 (Pereira, 2014).

Um dos materiais que apresenta um comportamento viscoelástico muito complexo, em condições típicas de serviço, é o betume.

Contudo, as propriedades reológicas do betume têm sido descritas por testes empíricos, como a determinação da penetração (EN 1426:2007) e da temperatura de amolecimento, determinada pelo método de anel e bola (EN 1427:2007). Para uma melhor definição do comportamento dos betumes é necessário recorrer a um vasto número de ensaios, uma vez que têm de ser testados com diferentes temperaturas e tempos de carregamento (Yussof, 2012).

Em 1954, Van der Poel descreveu o comportamento de misturas betuminosas através de modelos viscoelásticos, introduzindo o conceito de rigidez do betume. Estes modelos são bastante importantes visto que se aproxima, de uma forma muito real, do comportamento de mastiques betuminosos. O comportamento do betume é muito dependente da temperatura e da frequência de carregamento (Abbas, 2004; Lee, 2006).

Utilizando o ábaco de Van der Poel, apresentado na Figura 2.6, é possível estimar o módulo complexo do betume (em N/m^2), através da frequência (em Hz), da diferença de temperatura a que se encontra o material e a temperatura do ponto de amolecimento e do índice de penetração. Ressalva-se que este ábaco não se revela adequado para o caso dos betumes modificados.

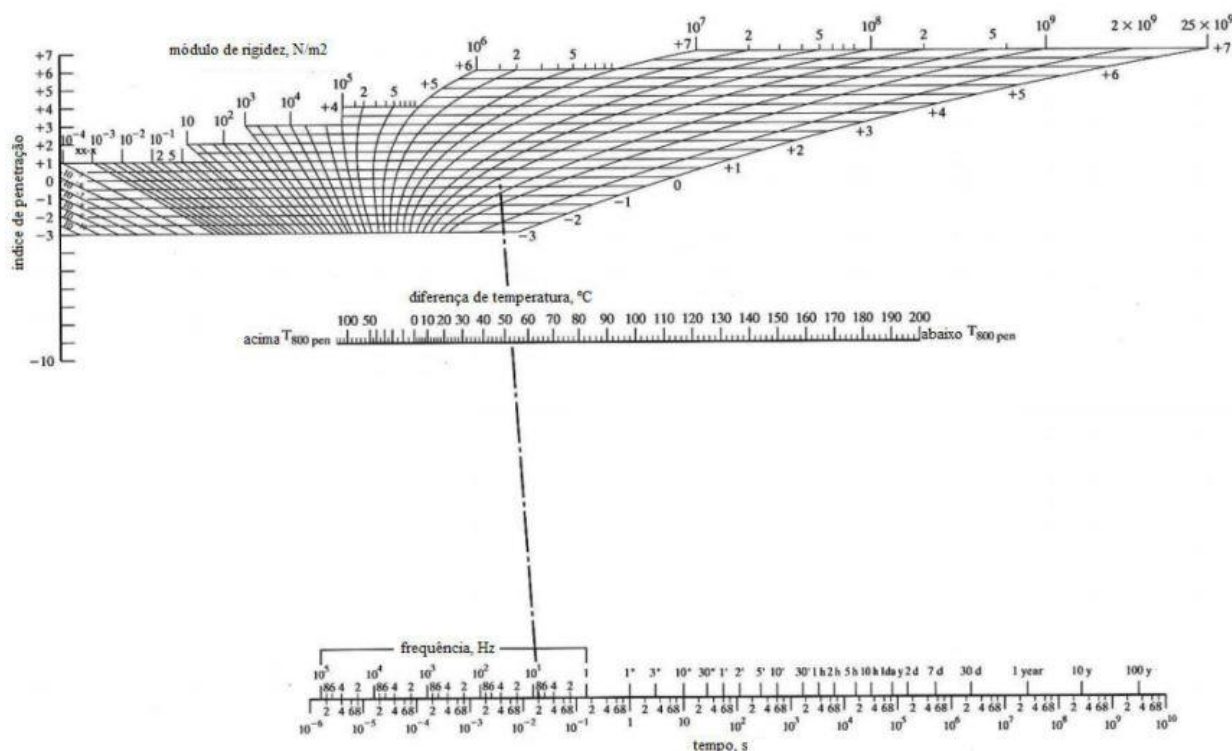


Figura 2.6 – Ábaco de Van der Poel para a determinação da rigidez do betume (Ribeiro, 2011).

Em suma, a caracterização reológica do betume puro e modificado e consequentemente dos mastiques, é bastante importante uma vez que não existe uma caracterização experimental dos seus comportamentos. Apesar da campanha experimental ser bastante extensa, em relação aos ensaios tradicionais, os parâmetros obtidos estabelecem uma relação direta com o comportamento das misturas betuminosas. Também se pode concluir que, no futuro, estes valores possam fazer parte integrante das fichas técnicas dos betumes e funcionar como especificações no fabrico dos mastiques e das misturas betuminosas.

2.2. Ângulo de fase e módulo complexo

O mástico, parte integrante e fundamental de uma mistura betuminosa, tem um comportamento do tipo viscoelástico. Este pode ser definido pelo módulo complexo e do ângulo de fase, que variam dependendo da temperatura e da frequência de aplicação das cargas. Assim é possível prever qual o tipo de resposta que o pavimento terá às cargas e velocidades de circulação dos veículos.

Na presença de temperaturas reduzidas e tempos de carregamento curtos, a rigidez do mástico é mais elevada, tendo este um comportamento essencialmente elástico com um ângulo de fase muito reduzido. Se as temperaturas forem mais elevadas e os tempos de carregamento longos, o comportamento dos betumes é substancialmente viscoso, tendo menor rigidez e sendo o ângulo de fase de valor mais elevado.

Existem algumas recomendações relativamente aos ensaios para a obtenção do módulo complexo e do ângulo de fase. O tipo de ensaio utilizado para essa determinação é importante visto que

se para o ângulo de fase se consegue uma boa reprodutibilidade, independentemente do ensaio utilizado, para o módulo complexo existem desvios significativos. Já para a repetibilidade, o módulo complexo é um bom indicador das características mecânicas de uma mistura betuminosa. Se for efetuado com cuidado, o desvio dos valores pode atingir apenas um valor baixo de 5% (Benedetto *et al.*, 2001).

Assim, os ensaios mais usados para determinar as propriedades acima referidas, são ensaios cíclicos, com aplicação de uma deformação sinusoidal. No caso de um ensaio com aplicação de uma deformação uniaxial:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

em que a deformação ε varia com o tempo t , com uma amplitude ε_0 e frequência angular ω .

A tensão uniaxial que resulta da aplicação daquela deformação é dada por,

$$\sigma = \sigma_0 \times \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.5)$$

onde φ é o ângulo de fase e σ_0 é a amplitude. Assim a deformação e tensão são caracterizadas pela mesma frequência, mas apresentando um desfasamento, sendo esse caracterizado pelo ângulo de fase. Se φ for nulo, a mistura betuminosa tem um comportamento predominantemente elástico, se tomar valores próximos de 90° tem um comportamento viscoso (Neves e Correia., 2006). Na Figura 2.7 podemos observar esse desfasamento.

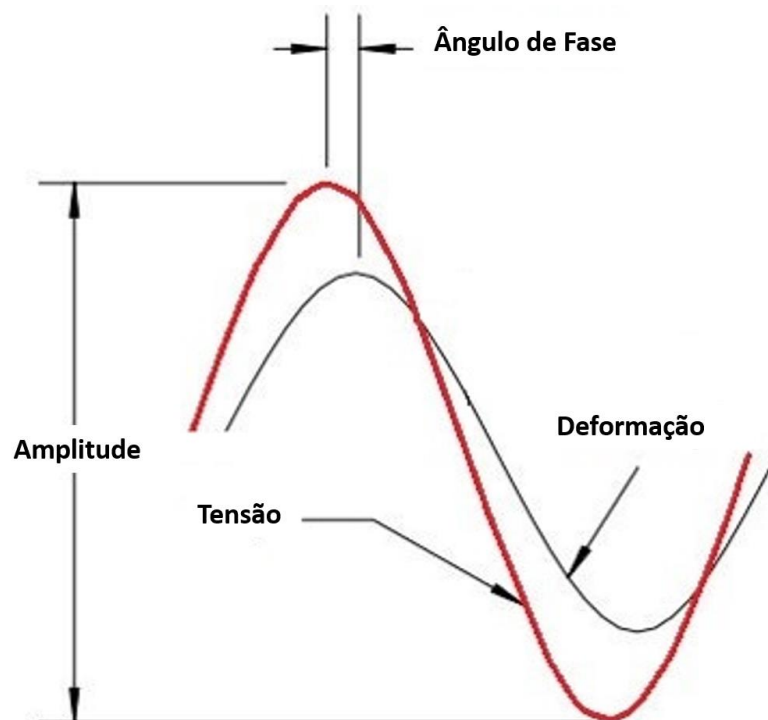


Figura 2.7 - Relação tensão-deformação durante um ensaio cíclico uniaxial de carga sinusoidal (adaptado de NCHRP Project 9-29).

Com base na amplitude de deformação aplicada e da tensão resultante define-se o módulo complexo da mistura betuminosa de acordo com a equação:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \times [\cos(\varphi) + i \times \sin(\varphi)] = |E^*| \times [\cos(\varphi) + i \times \sin(\varphi)] \quad (2.6)$$

onde i é a unidade imaginária ($i^2 = -1$) e $|E^*|$ é o módulo complexo.

O módulo complexo é caracterizado por duas componentes: uma componente real (E_1) e uma componente imaginária (E_2). A componente real (E_1), designada por módulo conservativo, representa a energia armazenada no material, e a componente imaginária (E_2), designada por módulo dissipativo, representa a energia perdida por atrito interno no seio do material. Estas duas componentes são expressas matematicamente por:

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\varphi) \quad (2.7)$$

$$E_2 = |E^*| \times \sin(\varphi) \quad (2.8)$$

Na Figura 2.8 é possível observar a relação de todos os parâmetros.

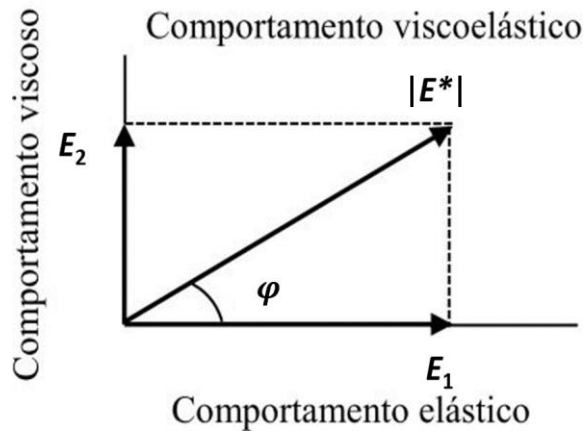


Figura 2.8 – Relação entre $|E^*|$, E_1 , E_2 e φ (adaptado de Airey, 1997).

Assim o módulo complexo $|E^*|$ e o ângulo de fase (φ) podendo ser obtidos por:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.9)$$

$$\varphi = \arctang\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (2.10)$$

Para além dos ensaios de tração/compressão uniaxial (com ou sem confinamento), o módulo complexo pode ser determinado através dos seguintes ensaios:

- Ensaios de corte (G^*);
- Ensaios de flexão (E^*);
- Ensaios de tração indireta (E^*).

Pode-se relacionar o módulo complexo ($|E^*|$) com o módulo complexo de corte (G^*) através da seguinte equação:

$$G^* = \frac{E^*}{2 \times (1 + \nu)} \quad (2.11)$$

O valor do coeficiente de Poisson (ν) depende da temperatura e da frequência, variando entre 0,2 para baixas temperaturas e 0,5 para altas temperaturas, pelo que a utilização de um valor intermédio será o procedimento mais adequado (Benedetto *et al.*, 2001). De salientar que esta equação apenas pode ser utilizada para materiais elásticos.

2.3. Modelos reológicos

Para uma melhor compreensão do comportamento reológico dos materiais constituintes dos pavimentos rodoviários foram estabelecidos modelos numéricos e mecânicos capazes de os descrever. Os modelos numéricos recorrem a formulações que se ajustam aos resultados experimentais enquanto os modelos mecânicos usam uma combinação de elementos (sobretudo molas e amortecedores), devido ao facto das propriedades viscoelásticas poderem ser traduzidas por estes (Yussof, 2012).

Neste trabalho optar-se-á por modelos mecânicos, sendo apresentados de seguida alguns desses modelos.

O modelo de Burgers é um modelo bastante utilizado por traduzir de forma bastante aproximada o comportamento dos materiais betuminosos. Consiste na combinação em série de dois modelos:

- O modelo de Maxwell é constituído por uma mola e um amortecedor disposto em série. Se ao mecanismo for aplicada uma tensão instantânea, a mola deforma-se instantaneamente. Contudo, se a extensão for mantida constante, a tensão vai diminuindo progressivamente até zero (Branco *et al.*, 2011);
- O modelo de Kelvin é constituído, também por uma mola e um amortecedor mas desta vez em paralelo. Neste mecanismo a mola e o amortecedor estão sujeitos a mesma extensão, e a tensão é o somatório das tensões de cada elemento (Branco *et al.*, 2011).

Na Figura 2.9 estão representados os modelos de Maxwell (a) e de Kelvin (b) e a sua combinação, modelo de Burgers (c). Este é constituído por duas molas de módulo de deformabilidade E_m e E_k e por dois amortecedores de viscosidade η_1 e η_2 .

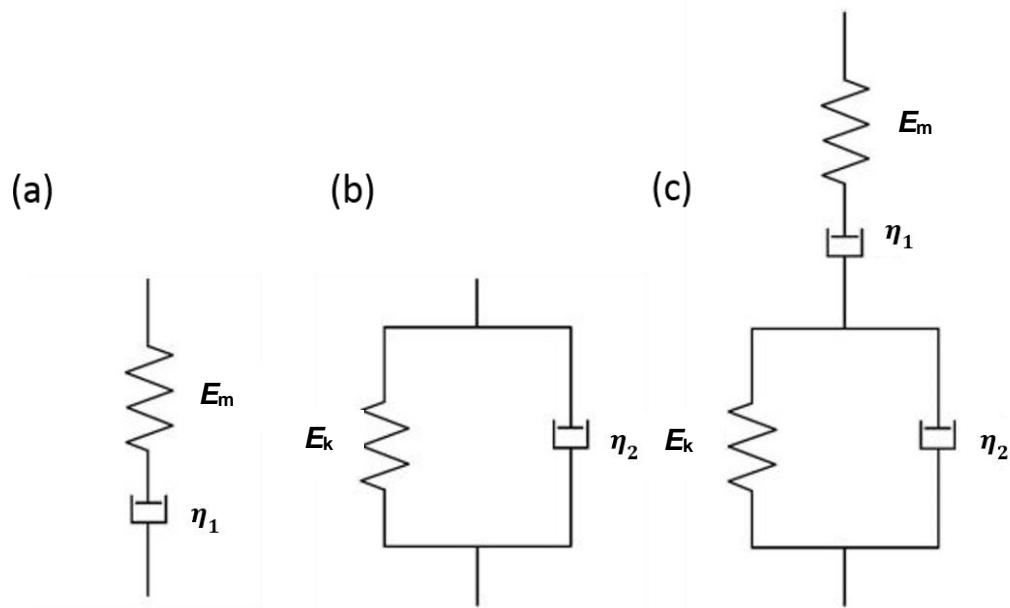


Figura 2.9 - Modelos Reológicos: (a) de Maxwell, (b) de Kelvin e (c) de Burgers.

A deformação ao longo do tempo do modelo de Burgers, sob tensão constante, é descrita pela equação:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_m} + \left(1 + \frac{t}{T_1}\right) + \frac{\sigma}{E_k} + \left[1 - e^{\left(-\frac{t}{T_2}\right)}\right] \quad (2.12)$$

onde ε é a extensão, σ é a tensão, E_m e E_k o módulo de elasticidade da mola de Maxwell e Kelvin, respetivamente; t o tempo, T_1 o tempo de relaxação ($T_1 = \eta_1 / E_m$), T_2 é o tempo de atraso ($T_2 = \eta_2 / E_k$), η_1 e η_2 a viscosidade do amortecedor de Maxwell e Kelvin, respetivamente.

A extensão é composta por três parcelas: uma de extensão instantânea, uma de extensão retardada e uma extensão de viscosidade. Para a extensão instantânea, o valor de E_m tem grande contribuição já para a extensão retardada essa contribuição é feita por E_k e η_2 . No que diz respeito as extensão de viscosidade, o valor de η_1 é o que tem maior contribuição. Para a mesma extensão, uma repetição do carregamento leva a para uma deformação permanente das misturas betuminosas. Após a obtenção do módulo complexo (E^*) e do ângulo de fase (φ) para várias temperaturas e frequências, é possível determinar os parâmetros para a caracterização mecânica do material (Branco *et al.*, 2011; Vale, 2004).

Na Figura 2.10 é apresentada o comportamento dos modelos de Maxwell, Kelvin e Burgers para uma tensão constante durante o intervalo de tempo entre t_0 e t_1 .

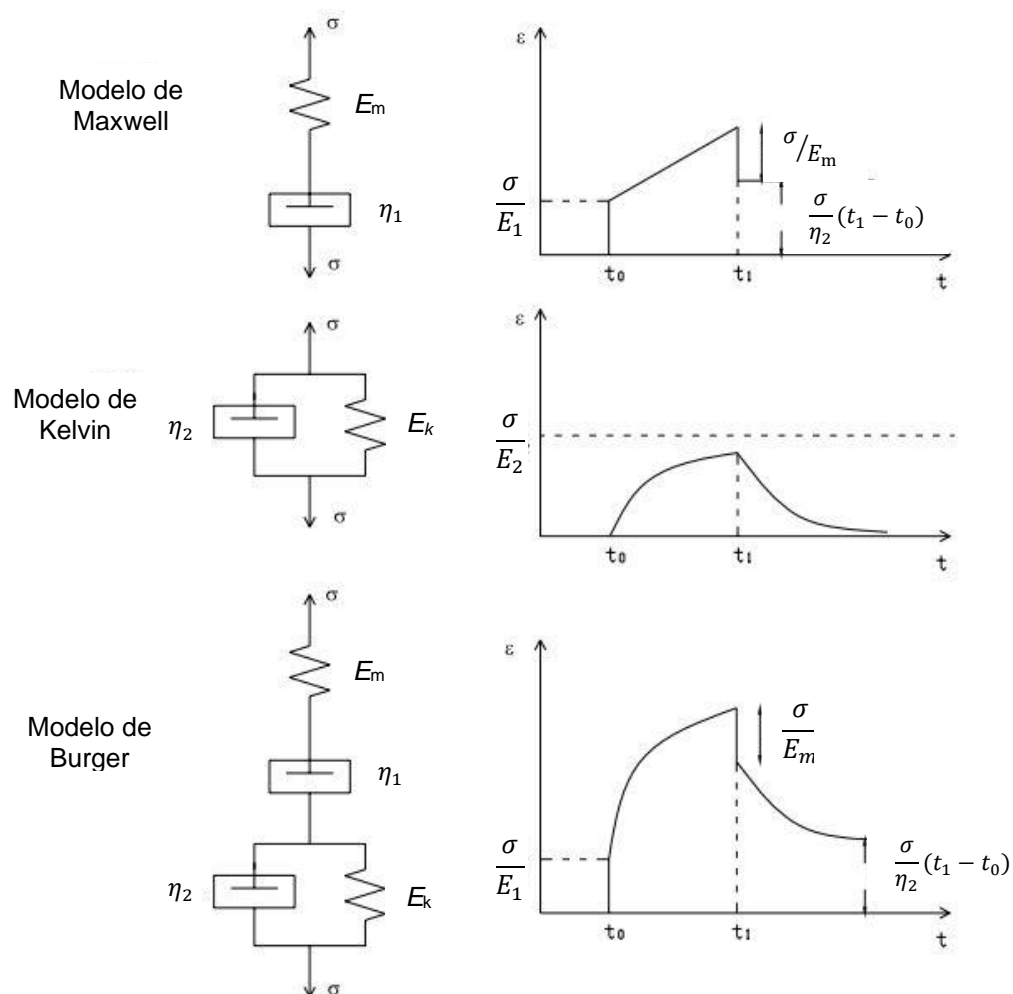


Figura 2.10 – Comportamento do modelo de Maxwell, Kelvin e Burgers para uma tensão constante durante o intervalo de tempo ($t_0 - t_1$) (adaptado de Micaelo, 2008).

Ao longo dos tempos foram introduzidos outros modelos derivados dos modelos mais elementares de Maxwell e de Kelvin, onde são introduzidos amortecedores de viscosidade variável. É o caso dos modelos de Huet-Sayegh, de Huet-Sayegh modificado ou 2S2P1D. Na Figura 2.11 observa-se uma evolução nos modelos, que se tornaram mais complexos de forma a aproximar-se do comportamento real das misturas betuminosas.

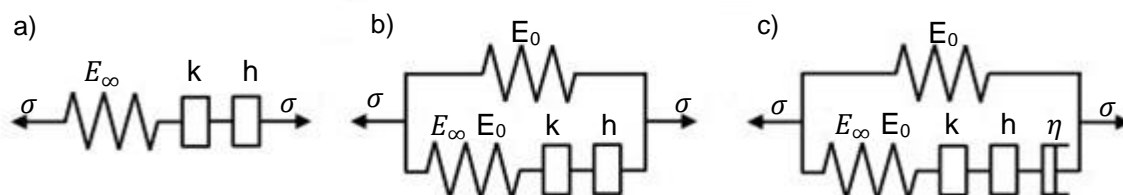


Figura 2.11 - Modelos reológicos de Huet (a), de Huet Sayegh (b) e 2S2P1D (c) (adaptado Pereira, 2014).

Desenvolvido por Olard e Di Benedetto (2003), o modelo 2S2P1D significa a associação de duas molas, dois amortecedores parabólicos e um amortecedor linear (*2 Springs, 2 Parabolic creep elements and 1 Dashpot*). Neste modelo, o módulo complexo é calculado através da equação:

$$E^*(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \alpha(i\omega\lambda)^{-k} + (i\omega\lambda)^{-h} + 1 + (i\omega\beta\lambda)^{-1}} \quad (2.13)$$

onde k e h expoente tais que $0 < k < h < 1$, α é uma constante, E_0 é o valor do módulo complexo quando $\omega \rightarrow 0$, E_∞ é o valor do módulo complexo quando $\omega \rightarrow \infty$. Pode-se obter a constante β dada pela equação:

$$\beta = \frac{\eta}{(E_\infty - E_0)\lambda} \quad (2.14)$$

onde η representa a viscosidade newtoniana (associada ao amortecedor linear) e λ é uma constante designada por tempo característico que depende da temperatura. Assim estes parâmetros são específicos para cada tipo de betume (Yussof, 2012).

Ainda assim, a equação 2.13 pode ser apresentada por (Van Rompu, 2006):

$$E^*(\omega) = \left[E_0 + \frac{(E_\infty - E_0) \times (1 + A(\omega))}{(1 + A(\omega)^2) + B^2(\omega)} \right] + i \left[\frac{(E_\infty - E_0) \times (-B(\omega))}{(1 + A(\omega)^2) + B^2(\omega)} \right] \quad (2.15)$$

em que:

$$A(\omega) = \alpha(i\omega\lambda)^{-k} \times \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) + (\omega\lambda)^{-h} \times \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) \quad (2.16)$$

e

$$B(\omega) = -(\alpha\beta\lambda)^{-1} - \alpha(\omega\lambda)^{-k} \times \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) - (\omega\lambda)^{-h} \times \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \quad (2.17)$$

Assim, na equação 2.14 a parte real e imaginária encontram-se separadas, podendo ser úteis para o calcular o módulo complexo absoluto e o ângulo de fase a partir das equações 2.9 e 2.10.

Alguns parâmetros utilizados no cálculo do módulo complexo (equação 2.13) no modelo 2S2P1D, apresentam funções bem definidas como se pode observar no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Funções dos parâmetros h , k , α e β (Yussof, 2012).

Parâmetro	Função
h	Controla o declive do diagrama Cole-Cole para baixos valores de E_2
k	Controla o declive do diagrama Cole-Cole para elevados valores de E_2
α	Controla o declive da curva-mestra na região de baixas temperaturas ou elevadas frequências e a altura do pináculo do diagrama Cole-Cole
β	Controla o declive da curva-mestra na região de elevadas temperaturas ou baixas frequências

Uma forma de se obter as constantes do modelo 2S2P1D consiste em minorar a diferença entre o módulo complexo obtido experimentalmente e aquele que foi calculado a partir do modelo em n pontos

de frequência angular ω_i . Assim, à temperatura de referência (T_{ref}), pode utilizar-se funções de cálculo de forma a minimizar a seguinte equação (Olard e Benedetto, 2003).

$$\sum_{i=1}^{i=n} ([E_1(\omega_i) - E_{1m}(\omega_i)]^2 + [E_2(\omega_i) - E_{2m}(\omega_i)]^2) \quad (2.18)$$

onde $E_1(\omega_i)$ e $E_2(\omega_i)$ correspondem, respetivamente, ao módulo conservativo e dissipativo que foram obtidos experimentalmente e $E_{1m}(\omega_i)$ e $E_{2m}(\omega_i)$ representam, respetivamente, o módulo conservativo e dissipativos calculados a partir do modelo 2S2P1D.

Num estudo onde foi utilizado o modelo 2S2P1D constatou-se que a reologia das misturas betuminosas pode estar correlacionada com a dos betumes. Dos 7 parâmetros, 4 apresentaram valores idênticos para o ligante e respetiva mistura (Olard e Benedetto, 2003).

Por sua vez, se for conhecido o módulo complexo do betume utilizado para a mastique, são precisos apenas determinar os parâmetros α , E_0 e E_∞ para se obter o módulo complexo da mistura. Isto porque estes dependem do tipo fíler e da razão fíler/betume utilizada da mistura (Benedetto *et al.*, 2004).

Utilizando o mesmo modelo verificou-se que a baixas temperaturas os módulos complexos dos mastiques não depende do tipo de fíler mas sim da razão, volumétrica, fíler/betume (Delaport *et al.*, 2009).

Yussof (2012) confirmou que pode-se aplicar o modelo 2S2P1D a mastiques betuminosos, uma vez que os resultados obtidos são satisfatórios. Observou ainda que o tipo e a quantidade fíler fazem variar o módulo complexo.

Por ser um modelo relativamente recente, não existem na literatura muitos casos experimentais com o mesmo. Todavia, este modelo aparenta descrever de uma forma plausível o comportamento dos materiais betuminosos, tendo como base a teoria da viscoelasticidade.

2.4. Representação das propriedades reológicas

Como já referido anteriormente, os resultados do módulo complexo e do ângulo de fase dependem muito das condições de temperatura e da frequência a que o ensaio é realizado. Desta forma, foi necessário recorrer a várias representações gráficas de modo a que os resultados possam ser apresentados e avaliados de forma perceptível.

As representações mais usuais são:

- Isócronas;
- Isotérmicas;
- Curvas-mestras;
- Diagrama de Black;
- Diagramas de Cole-Cole.

De seguida, serão apresentados alguns tipos de representações mais comuns.

2.4.1. Isócronas

Num gráfico em que as curvas do módulo complexo ou do ângulo de fase estão em função da temperatura, a uma frequência constante, é considerado uma isócrona. Este tipo de representação avalia a variação das propriedades reológicas dos mastiques em função da temperatura.

Na Figura 2.12 e na Figura 2.13 ilustram-se exemplos de isócronas do módulo complexo e do ângulo de fase de misturas betuminosas de desgaste, submetidas a uma frequência de 10 Hz.

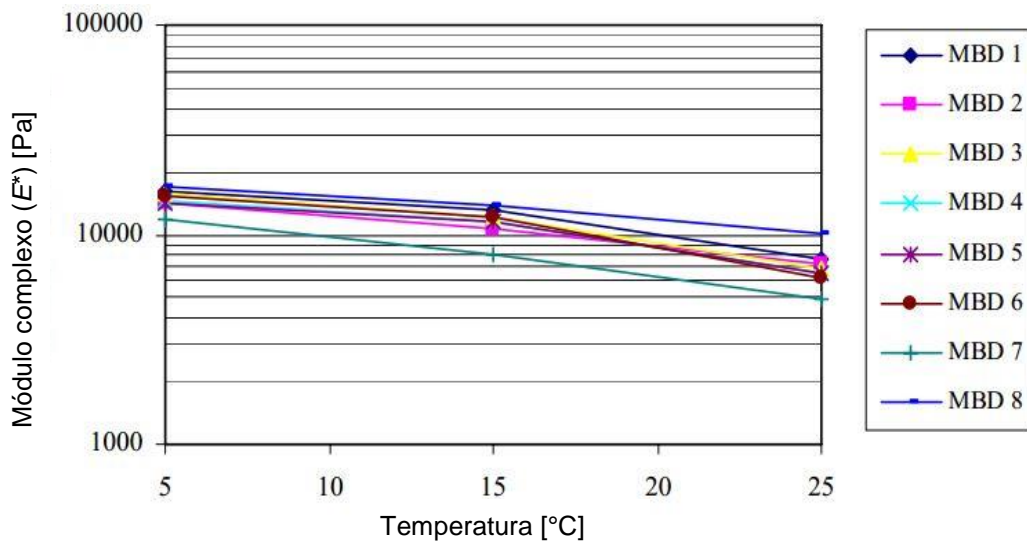


Figura 2.12 - Exemplo de isócrona do módulo complexo de misturas betuminosas de desgaste (MBD) submetidas a uma frequência de 10 Hz (adaptado de Silva, 2005).

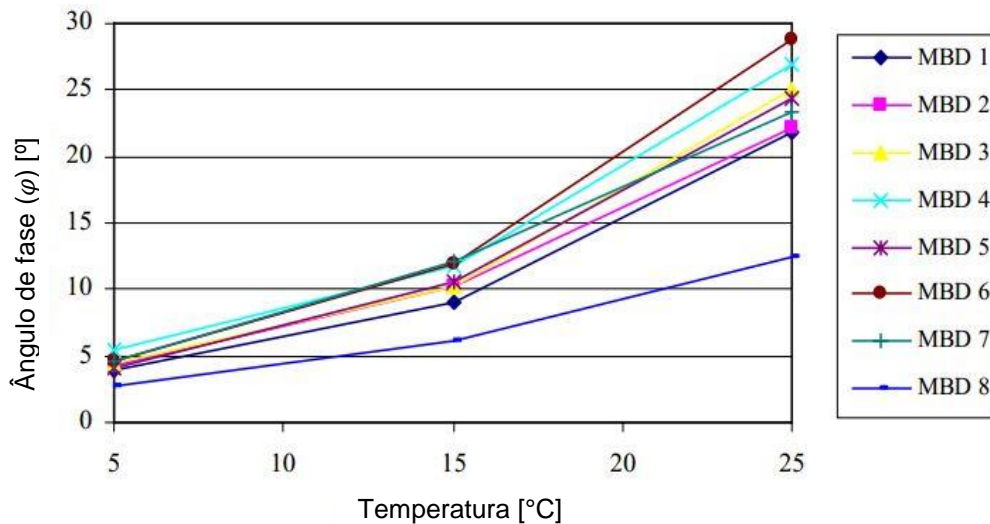


Figura 2.13 – Exemplo de isócrona de ângulo de fase de misturas betuminosas de desgastes (MBD) submetidas a uma frequência de 10 Hz (adaptado de Silva, 2005).

2.4.2. Isotérmicas

As isotérmicas têm um parâmetro constante, à semelhança como a isócronas. Neste caso e como indica o nome, a temperatura. Assim num gráfico em que as curvas do módulo complexo ou do ângulo de fase estão em função da frequência, a uma dada temperatura constante, é considerado uma isotérmica.

Esta representação permite avaliar a variação das propriedades reológicas dos mastiques em função da temperatura.

Na Figura 2.14 e Figura 2.15 apresentam-se exemplos de isotérmicas do módulo complexo e do ângulo de fase de mastiques betuminosos, submetidos a uma temperatura de 20°C.

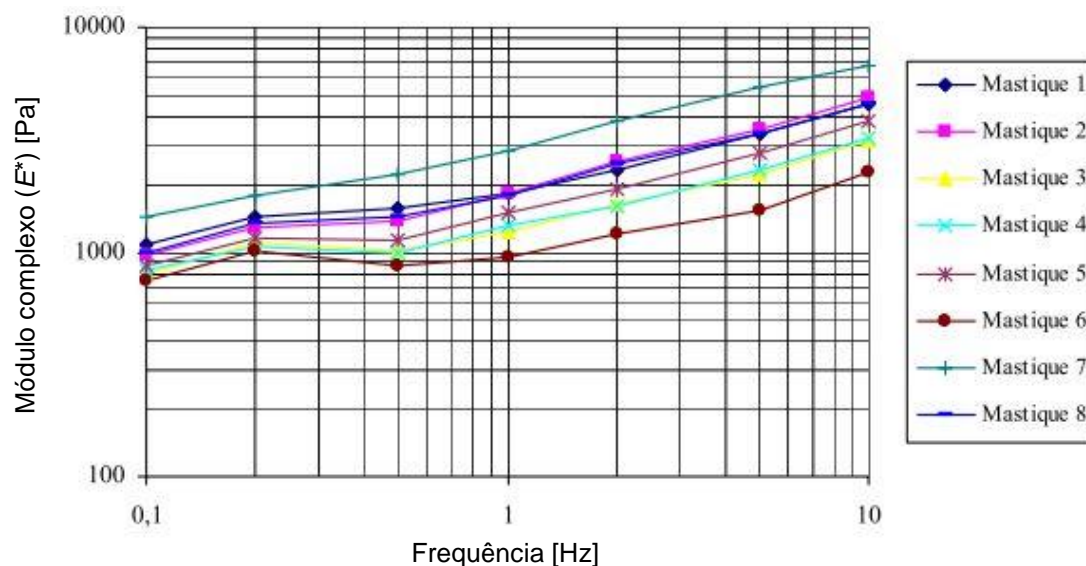


Figura 2.14 - Exemplo de isotérmica do ângulo de fase de mastiques betuminosos submetidas a uma temperatura de 20°C (adaptado de Silva, 2005).

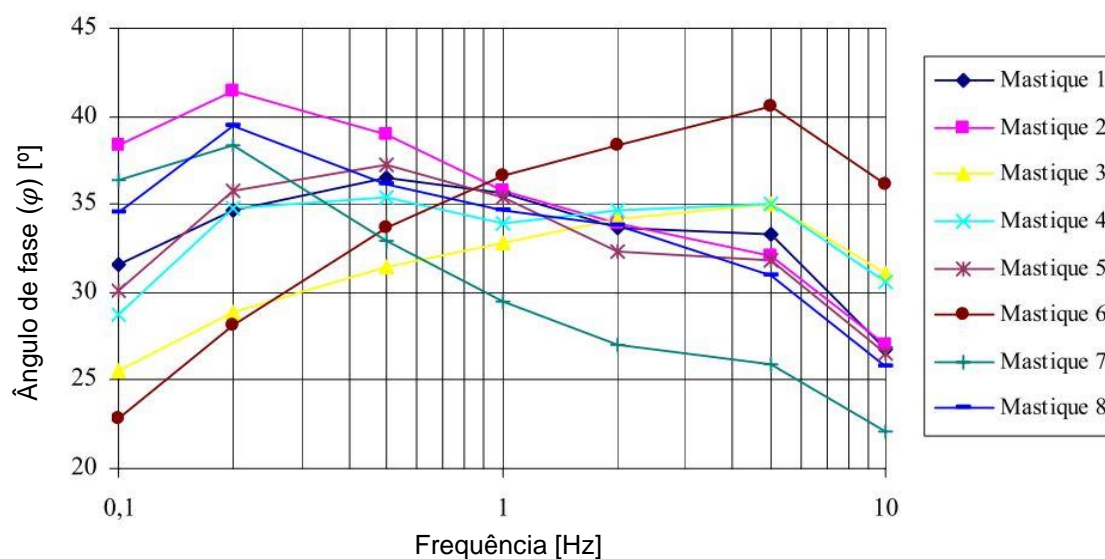


Figura 2.15 Exemplo de isotérmica do ângulo de fase de mastiques betuminosos submetidas a uma temperatura de 20°C (adaptado de Silva, 2005).

2.4.3. Curvas-mestras

Segundo vários investigadores, existe uma inter-relação entre temperatura e frequência (tempo de carregamento). O princípio da sobreposição tempo-temperatura (TTSP – *Time Temperature Superposition Principle*) permite, não só estabelecer a referida relação entre frequência e temperatura, mas também produzir uma curva contínua, ou seja, a curva mestra. A curva-mestra é um combinado de várias curvas isotérmicas, que são deslocadas manualmente, para que a sua sobreposição resulte numa curva única a uma dada temperatura de referência (T_{ref}), podendo esta ser arbitrariamente escolhida (Airey, 1997). Na Figura 2.16 é apresentado um exemplo de aplicação do princípio da sobreposição tempo-temperatura para a construção de uma curva-mestra correspondente ao módulo complexo.

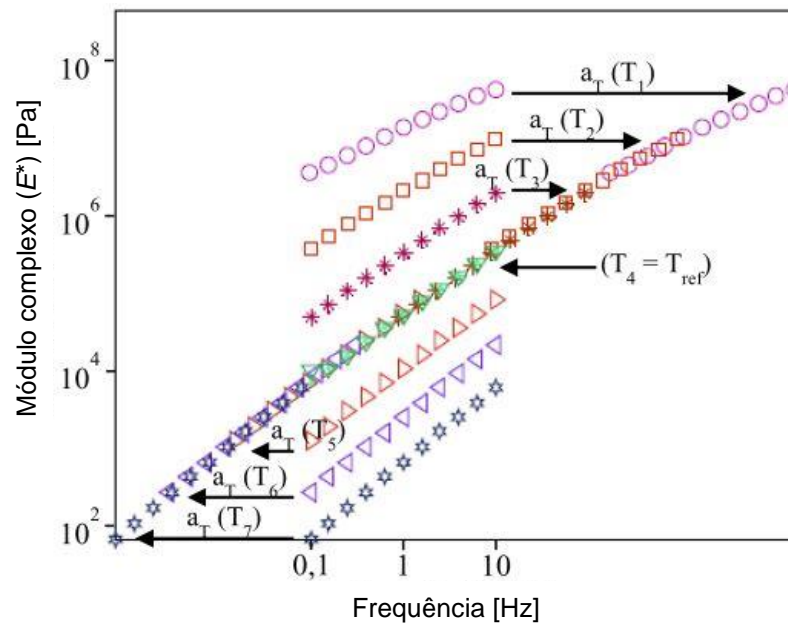


Figura 2.16 - Exemplo de aplicação do princípio da sobreposição tempo-temperatura para a construção de uma curva-mestra correspondente ao módulo complexo (Pereira, 2014).

De modo a obter a sobreposição pretendida é necessário ter em conta o fator deslocamento. Nos estudos que dizem respeito a materiais betuminosos, apenas se tem considerado fatores correspondentes a deslocamentos horizontais (a_T), dependentes apenas da temperatura (Yussof, 2012).

Assim as curvas-mestras tem como eixo das abcissas uma nova variável, originada pela combinação da temperatura e do logaritmo da frequência, denominada por frequência equivalente ou frequência logarítmica reduzida ($\log(f_r)$), será dada por:

$$\log(f_r) = \log(f) + \log a_T \quad (2.19)$$

Assim a curva de referência, curva isotérmica correspondente à temperatura de referência, terá um valor de $\log(a_T) = 0$ e, portanto, $\log(f_r) = \log(f)$. As restantes curvas isotérmicas terão valores de $\log(a_T)$ positivos ou negativos, consoante o seu deslocamento seja para a direita ou para a esquerda, respetivamente, de forma a se alinhar com a curva de referência. Na Figura 2.16 pode-se observar que a temperatura T_4 é a temperatura de referência. Para as curvas com temperaturas superiores a T_4 (T_5 , T_6 e

T_7) existe a necessidade de efetuar um deslocamento manual para a esquerda, ao invés das curvas com temperaturas inferiores a T_4 (T_1 , T_2 e T_3) que necessitam de efetuar um deslocamento manual para a direita. Deste modo as curvas alinham-se e obtém-se a curva-mestra.

De acordo com vários trabalhos os fatores de deslocamento utilizados na construção de uma curva-mestra podem ser obtidos aplicando modelos que permitam descrever a relação entre a temperatura e o $\log(a_T)$ ou simplesmente numa tabela onde é observada essa relação. No presente trabalho utiliza-se e cita-se apenas a equação de Williams, Landel e Ferry, visto que a mesma tem sido utilizado por muitos autores, como Di Benedetto, Airey, Delaporte e Yussof. Esta equação fornece um notável ajustamento aos valores de a_T em detrimento das equações de Arrhenius e VTS (*Viscosity Temperature Susceptibility*) (Airey, 1997; Yussof *et al*, 2011).

A equação de William, Landel e Ferry é então dada por:

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (2.20)$$

em que a_T é o fator de deslocamento associado à temperatura T , T_{ref} é a temperatura de referência e C_1 e C_2 são constantes empíricas que dependem do material. Estas constantes podem ser calculadas a partir da forma linear da equação (2.21), vindo (Airey, 1997):

$$-\frac{T - T_{ref}}{\log(a_T)} = \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{C_1}(T - T_{ref}) \quad (2.21)$$

Os valores das constantes C_1 e C_2 podem ser bastante variáveis, sendo preferível que estas sejam obtidas com base nos resultados experimentais realizados, recorrendo a um processo de tentativa erro de forma a melhorar a curva o máximo possível. Alguns fatores que também influenciam a construção da curva mestra são o tipo de betume, a temperatura de referência escolhida ou o estado de envelhecimento do material (Airey, 1997; Yussof, 2012).

Algumas das irregularidades encontradas na construção das curvas-mestras denotam-se principalmente em misturas com ligantes modificados com polímeros. Assim para uma abordagem mais eficaz para estes casos, introduziu-se o termo PTTSP (*Partial Time-Temperature Superposition Principle*) (Benedetto *et al.*, 2004).

Tem que ser sublinhado que os coeficientes a_T são muito próximos para os ligantes e misturas associadas e estão de acordo com os resultados de trabalhos anteriores realizados por Doubbaneh e Di Benedetto. Pode concluir-se que o ligante betuminoso irá definir um a_T de qualquer mistura com ele concebido (Delaporte *et. al.*, 2009)

No entanto, mesmo existindo esta falta de consenso sobre a viabilidade do princípio TTSP, este tem sido bastante aplicado para a construção de curvas-mestras, quer no caso de betumes puros, quer no caso de betumes modificados (Cuadri *et al.*, 2013).

A Figura 2.17 e Figura 2.18 ilustram exemplos de curvas-mestras do módulo complexo e do ângulo de fase de um betume puro 50/70 e três mastiques com diferentes tipos de fíler (calcário, calcário + sílica e sílica). Estas curvas foram construídas tendo como T_{ref} de 15° C. Estes gráficos ilustram também linhas contínuas que apresentam um simulação de resultados utilizando o modelo 2S2P1D.

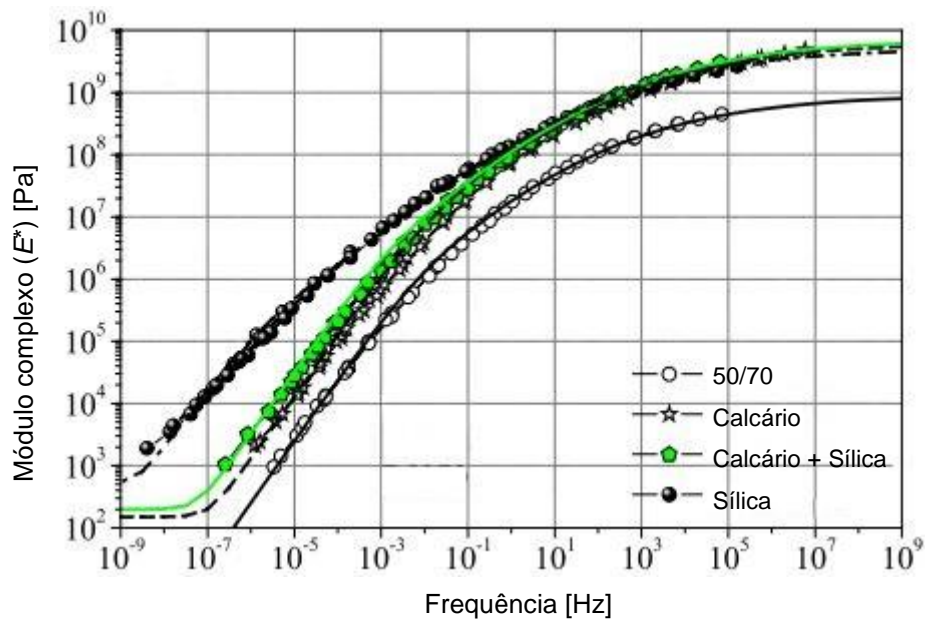


Figura 2.17 – Exemplo de curva-mestra do módulo complexo, com $T_{ref} = 15^\circ \text{C}$, para betume puro 50/70 e três mastiques com diferentes tipos de fíler (adaptado de Delaporte *et. al.*, 2009).

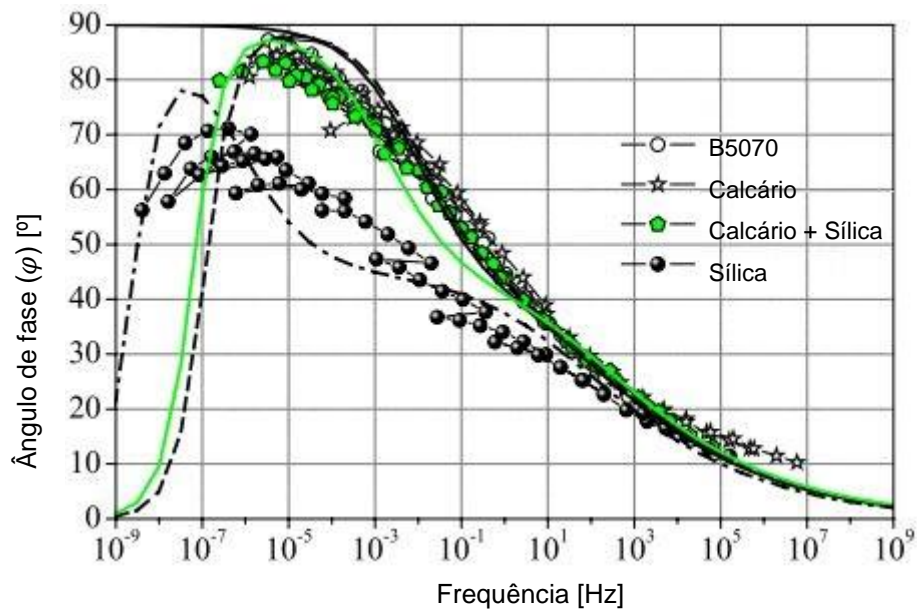


Figura 2.18 - Exemplo de curva-mestra do ângulo de fase, com $T_{ref} = 15^\circ \text{C}$, para betume puro 50/70 e três mastiques com diferentes tipos de fíler (adaptado de Delaporte *et. al.*, 2009).

De salientar, que as curvas-mestras permitem ter resultados para uma ampla gama de frequências, ultrapassando assim limitações existentes em alguns aparelhos de ensaio e o demorado processo do mesmo.

2.4.4. Diagramas de Black

Ao contrário dos gráficos anteriores onde a temperatura e/ou a frequência tem grande relevância na representação dos resultados obtidos, os diagramas de Black são gráficos onde o módulo complexo (E^*) é representado em função do ângulo de fase (φ) (Eurobitume, 1996).

Na Figura 2.19 é apresentado um exemplo de um diagrama de Black de alguns mastiques com betume puro 100/150 e com fíler de cimento, calcário e arenito. Também é apresentada uma comparação de resultados utilizando o modelo 2S2P1D para o mesmo tipo de mastiques.

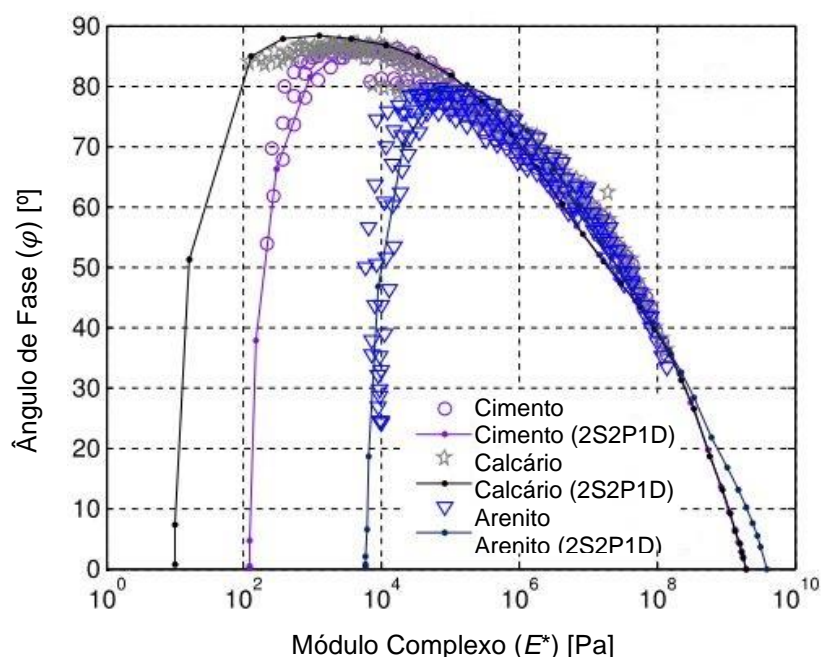


Figura 2.19 - Exemplo de um diagrama de Black de mastiques com betume puro 100/150 e com fíler de cimento, calcário e arenito (adaptado de Yussof, 2012).

O indicador de uma boa equivalência tempo-temperatura será uma curva suave, no diagrama de Black, ao invés de uma curva irregular ou dispersa. Se tal se observar, existe uma falha do princípio da sobreposição tempo-temperatura, associada por exemplo à presença de polímeros (Airey, 1997).

2.4.5. Diagramas de Cole-Cole

Outro diagrama para a apresentação das propriedades viscoelásticas dos betumes e dos mastiques betuminosos é o diagrama de Cole-Cole. Este, tal como o diagrama de Black dispensa a utilização da frequência e/ou da temperatura como um dos eixos (Airey, 1997). Assim o diagrama de Cole-Cole é definido como um gráfico do módulo dissipativo (E_2) em função do módulo conservativo (E_1) conforme representa na figura Figura 2.20 (Eurobitume, 1996; Yussof 2012).

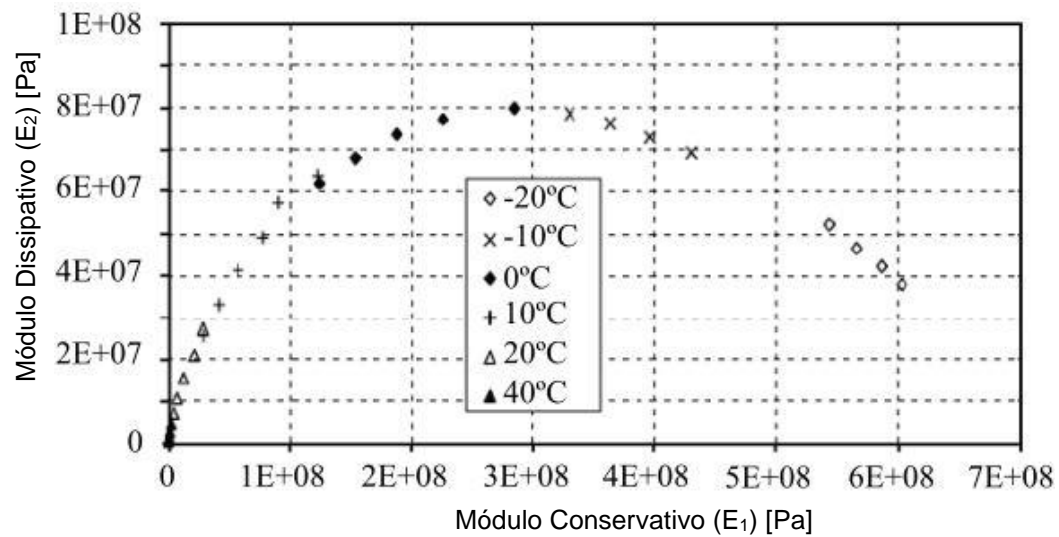


Figura 2.20 – Exemplo de um diagrama de Cole-Cole (Yussof, 2012).

De salientar que no presente trabalho não será possível apresentar um diagrama de Cole-Cole, uma vez que para tal seria necessário realizar ensaios a diferentes gamas de temperaturas, incluindo temperaturas negativas. Devido às limitações tanto dos provetes como do equipamento, tal não é possível de demonstrar.

3. Mastique betuminoso

3.1. Definição de mastique betuminoso

O mastique betuminoso resulta da combinação entre três componentes integrantes e essenciais das misturas betuminosas: os agregados finos, fíler e o ligante betuminoso.

Na Figura 3.1 pode-se observar a diferença de constituição entre as misturas e os mastiques betuminosos.

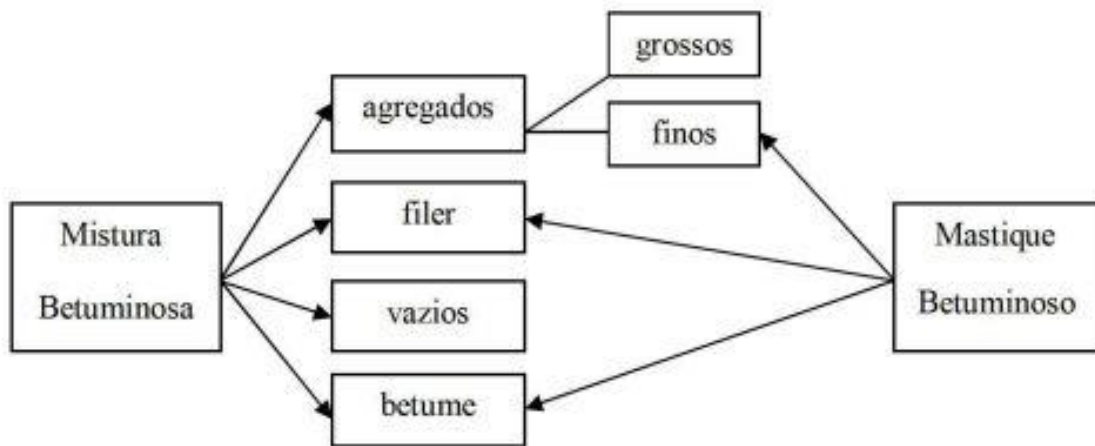


Figura 3.1 – Composição de mistura betuminosas e do mastique betuminoso (Ribeiro,2011).

Atualmente, e nos mais recentes trabalhos como Jimenez *et al.* (2008), Bardini *et al.* (2012), Liao *et al.* (2013), Airey *et al.* (2013), Matos *et al.* (2013) o mastique betuminoso é apenas constituído por betume e fíler, sendo este último considerado como todo o material que passa no peneiro com malha de 0,125 mm, sendo que a sua maioria passa no peneiro com malha de 0,063 mm. Esta composição será utilizada no presente trabalho, mais precisamente no fabrico dos mastiques betuminosos, apresentado no capítulo 4.

Esta combinação apresenta um comportamento viscoelástico que para além de envolver e manter ligados os agregados grossos, preenche os vazios existentes no esqueleto mineral de modo a obter e garantir uma boa trabalhabilidade, compacidade e impermeabilidade às misturas betuminosas (Silva, 2005; Bardini *et al.*, 2009). Desta forma o mastique envolve os elementos plásticos da mistura betuminosa.

Nesse contexto para uma melhor definição do mastique betuminoso é necessária uma caracterização do ligante betuminoso, do fíler e da relação fíler/betume.

Os ligantes betuminosos constituem a parte líquida da mistura e garantem a ligação entre os agregados, proporcionando coesão e estabilidade às misturas, desempenhando assim um papel fundamental nas misturas betuminosas (Cepsa, 2014). Estes ocupam cerca de 10 a 15% do volume total das misturas. Os betumes mais utilizados são, sendo a NP EN 12591 (2011):

- Betumes puros;
- Betumes modificados.

O betume puro é obtido por destilação direta do petróleo bruto sendo classificado, normalmente, através do valor obtido no ensaio de penetração, que avalia indiretamente a dureza do betume a uma dada temperatura. Assim os valores de penetração do betume puro, obtidos no ensaio de penetração (EN 1426:2007), variam entre 10/20 (betumes muito duros) até 180/220 (betumes muito fluidos). Por exemplo um betume puro 35/55 indica que o mínimo de penetração, numa amostra de 100g de betume a 25°C, é de 0,35 mm e o máximo de 0,55 mm.

Os betumes modificados podem ser obtidos pela adição ao betume puro de determinados agentes: aditivos (fíler, aditivos de adesividade, anti-oxidantes, componentes organometálicos, enxofre, entre outros), por polímeros (plastómeros, elastómeros naturais ou sintéticos, borrachas recuperadas e fibras orgânicas ou inorgânicas, resinas e endurecedores) ou através de reações químicas. Assim, estes são adicionados consoante o desempenho que se quer da mistura betuminosa em serviço (Silva, 2005).

Os fíleres podem ser distinguidos por dois tipos: o fíler comercial, produzido em instalações industriais segundo um processo controlado e o fíler recuperado, resultante do processo de britagem e secagem dos agregados grossos da mistura betuminosa por recuperação dos finos através de filtros de ar. Estes contêm partículas não hidrófilas e não plásticas, de modo a obter uma adequada mistura do fíler com o betume (Cepsa, 2014).

Existe alguma divergência de opiniões no que toca às definições de fíler e agregados finos. Referindo Velho *et al.* (1989) o fíler é todo o agregado que tem uma curva granulométrica que apresenta 100% de agregados passados no peneiro com malha de 0,250mm, 85% ou mais que passa no peneiro com malha 0,125 mm e ainda mais de 70% passe no peneiro com malha de 0,063 mm.

O fíler é definido como sendo um material com uma matriz de partículas minerais de outros agregados grossos e/ou finos (exemplo pó de calcário, cal hidratada, cimento) que pode melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e de resistência à ação da água, desde que obedecidos os limites definidos para a granulometria e a plasticidade (Santana, 1995).

O material fíler também é definido como um pó mineral cujas partículas têm maioritariamente uma dimensão inferior a 75 µm (Huang *et al.*, 2007; Quaresma, 2011).

Segundo a EN 13043 (2014) define-se por agregados finos todos os agregados com dimensão inferior a 2 mm, sendo o fíler o agregado cuja maior parte passa no peneiro com malha de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades.

Várias referências normativas têm em comum esta última definição de fíler, contudo nas normas de determinação das propriedades do fíler como a NP EN 933-10 (2009), NP EN 1097-4 (2012) e NP EN 1097-7 (2012), é considerada para o ensaio a fração que passa no peneiro com malha 0,125 mm (Antunes, 2013).

Ao analisar vários trabalhos sobre o mastique betuminoso pode-se deparar com diferentes definições deste material. Nos trabalhos de Harm and Hughes (1989), Mohamed and Nofal (1998), Sadd and Dai (2001), Buttlar and You (2001), Sadd *et al.* (2002) e You and Buttlar (2005) e Silva (2005) considera-se que o mastique betuminoso é constituído por betume, fíler e agregados finos de dimensão inferior a 2 mm.

A mesma definição encontra-se nos manuais de procedimento de ensaio para misturas betuminosas onde agregados grossos de uma mistura betuminosa correspondem aos agregados de

dimensões superiores a 2 mm (peneiro #10), enquanto agregados finos são os que passam no peneiro referido (Silva, 2005).

3.2. Comportamento do fíler

O fíler é uma componente de extrema importância para a formulação de mastiques betuminosos e, posteriormente, em misturas betuminosas. Este agregado fino quando adicionado ao ligante betuminoso, e quanto mais for adicionado, confere uma maior consistência ao ligante betume e, por sua vez, uma maior rigidez e resistência à deformação nos mastiques. Assim o desempenho das misturas depende das propriedades de coesão e adesão do mastique.

Grande parte da literatura centraliza-se apenas nas propriedades do fíler, enquanto as propriedades dos betumes não são apresentadas com grande detalhe. Isto deve-se ao facto dos betumes possuírem uma complexidade química e de não existir um método simples de os caracterizar. Também, de não ser conhecido o que o betume realmente afeta o comportamento do mastique (Faheem e Bahia, 2010).

Assim o estudo do comportamento do fíler, do tamanho das suas partículas, a sensibilidade à água e algumas das suas propriedades, tais como o índice de vazios de Rigden, tem alguma relevância.

Rigden, em 1947, introduziu um novo conceito para avaliar a porosidade, através do índice de vazios do fíler seco compactado, designado por índice de vazios de Rigden. Na Figura 3.2 apresenta-se um diagrama esquemático ilustrativo da ocupação dos vazios do fíler pelo betume.

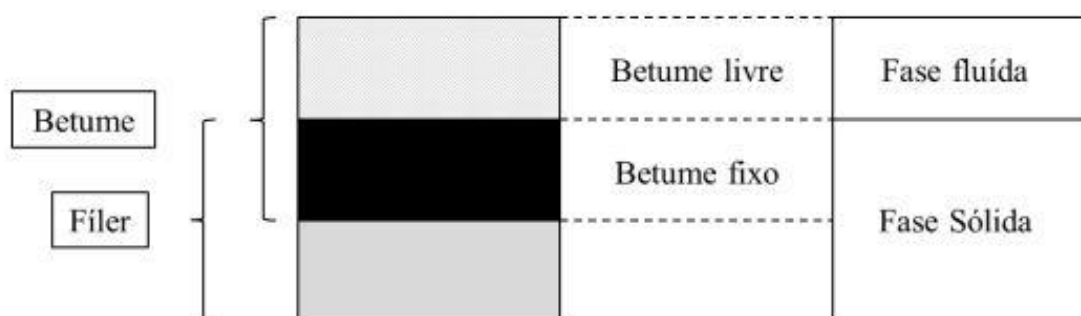


Figura 3.2 - Diagrama esquemático ilustrativo da ocupação dos vazios do fíler pelo betume (Quaresma e Antunes, 2002).

Assim designou-se por betume fixo o betume que preenche os vazios existentes no fíler, e de betume livre o restante, sendo este último aquele que oferece maior ou menos consistência do mastique. Desta forma Rigden afirmou que as mudanças na viscosidade eram independentes das características do betume e do fíler, com exceção do índice de vazios (Quaresma e Antunes, 2002; Faheem *et al.*, 2008).

Outro ensaio realizado para melhor compreensão do comportamento do fíler é a determinação do seu poder absorvente. Este ensaio é realizado tendo como base a norma francesa NF P 98-256-1, determinando a concentração volumétrica de betume no mastique quando deixa de se comportar como um fluido newtoniano passando a ter um comportamento plástico. É possível também determinar a concentração volumétrica máxima de fíler admissível num mastique betuminoso. Para isso estuda-se o comportamento do mastique à medida que a concentração de fíler cresce (Antunes, 2013).

A partir desses ensaios foram realizados vários estudos e conclui-se que diferentes tipos de fíler levam a diferentes resistências de cada mistura betuminosa devido a interação físico-química entre o fíler e o betume (Anderson e Goetz, 1973).

Foram produzidos vários mastiques com diferentes tipos de betume e um único tipo de fíler (cal hidratada) e conclui-se que a interação do fíler-betume não só é dependente do tipo de fíler, mas também o ligante pode ter um papel ativo (Lesueur e Little, 1999).

Além disso mostraram que a interação do fíler e do betume é mais perceptível quando existe um aumento de concentração de fíler (Kim *et al.*, 2003).

Avaliaram também a relação entre o poder absorvente e o índice de vazios de Rigden de vários tipos de fíler como de cimento, cal hidráulica, calcário e diferentes tipos de fíler de origem granítica. Observaram que os tipos de fíler com menor índice de vazios de Rigden têm um poder absorvente mais elevado. Na Figura 3.3 apresenta-se o índice de vazios, em percentagem, de alguns tipos de fíler (Quaresma e Antunes, 2002).

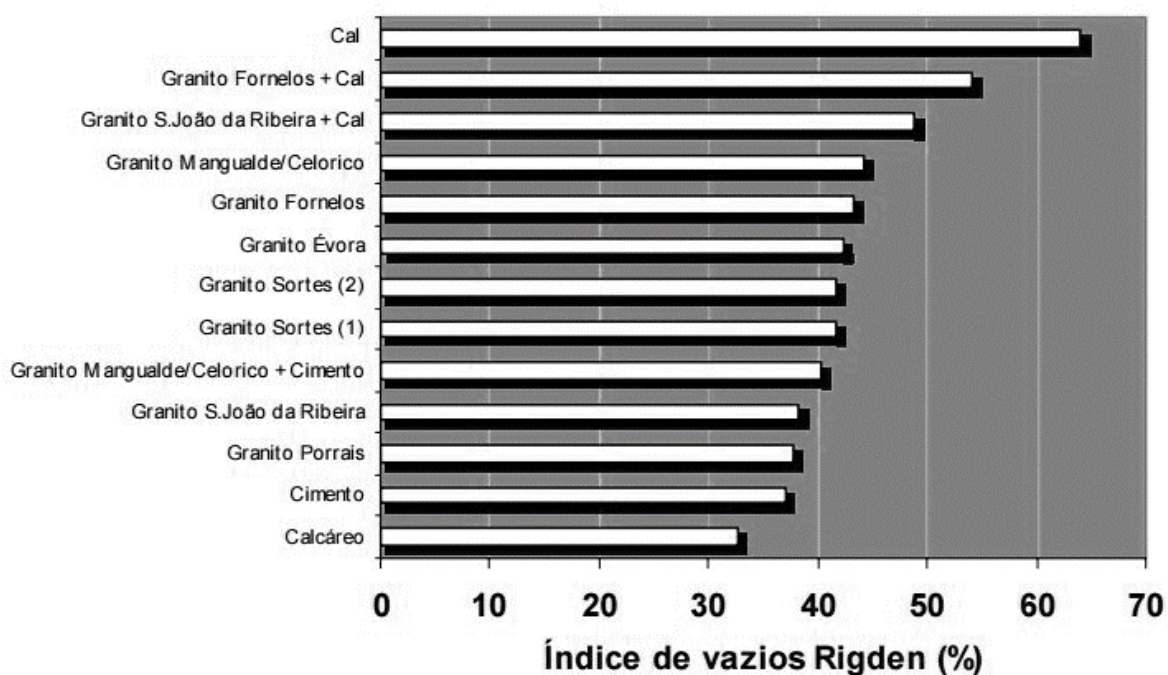


Figura 3.3 - Índice de vazios, em percentagem, de alguns tipos de fíler (Quaresma e Antunes, 2002).

Um estudo desenvolvido sobre dois tipos de fíler (cal hidratada e calcário) verificou que a adição de cal hidratada torna a mistura betuminosa menos rígida, conferindo uma carater mais dúctil da mesma em relação ao calcário (Recasens, *et al*, 2005).

A ligação de fíler-betume está relacionada com a adsorção e a absorção. Assim uma experiencia realizada utilizou-se o fíler silicioso, observando uma ligação mecânica, com baixa resistência, enquanto com outros tipos de fíler (cal) é química, com alta resistência (Silva, 2005)

Em oposição concluiu-se que a adsorção dos elementos de betume é proporcional à área de superfície do fíler e não é afetado pela composição química (Clopotel e Bahia, 2013).

A desagregação de uma mistura está diretamente relacionada com a falha adesiva entre o betume, o fíler e o agregado grosso. A penetração de água /humidade na interface de mastique- agregado grosso é considerada a principal causa para este tipo de situações. Nos resultados experimentais de um novo método de ensaio de aderência, concluiu-se que o fíler tem grande importância na consistência do mastique. Os mastiques com fíler de cal hidratada e de calcário demonstraram melhorar a resistência à tração. Em compensação, a adição de areia siliciosa não demonstrou ser uma mais valia (Jakarni, 2012).

Mais recentemente um estudo confirmou que o efeito do fíler varia de acordo com a sua natureza e com a sua razão no mastique. Quanto maior a concentração, em volume, de fíler no mastique betuminoso, menor a capacidade de prever a rigidez do mesmo devido ao facto de assumirem que os modelos empíricos não incluem a interação fíler-betume na previsão da rigidez do mastique (Faheem *et al.*, 2008).

O mesmo autor utilizou um novo método para quantificar o efeito do fíler no ligante dividindo esse efeito em duas partes: a fase diluída e a fase concentrada. A fase diluída, o efeito de endurecimento do fíler no ligante segue uma tendência linear de preenchimento em que a interação entre o fíler e o ligante é mínima. Por outro lado, com o aumento da concentração, em volume, o efeito do fíler afasta-se da tendência linear dando origem ao início da interação significativa entre as partículas do fíler e o ligante, denominado fase concentrada. Assim o modelo é definido com três parâmetros principais (1) taxa de endurecimento inicial, (2) taxa de endurecimento final, e (3) concentração crítica de fíler como se indica na Figura 3.4.

Com o objetivo de verificar que existe uma concentração crítica de fíler identificando as propriedades do fíler e do ligante que podem ser utilizado para modelar o aumento em módulo complexo em função da concentração do fíler. Assim será possível encontrar uma estimativa confiável da quantidade de fíler que pode ser usado numa mistura, sem adversamente afetar o desempenho da mistura betuminosa (Faheem e Bahia, 2009).

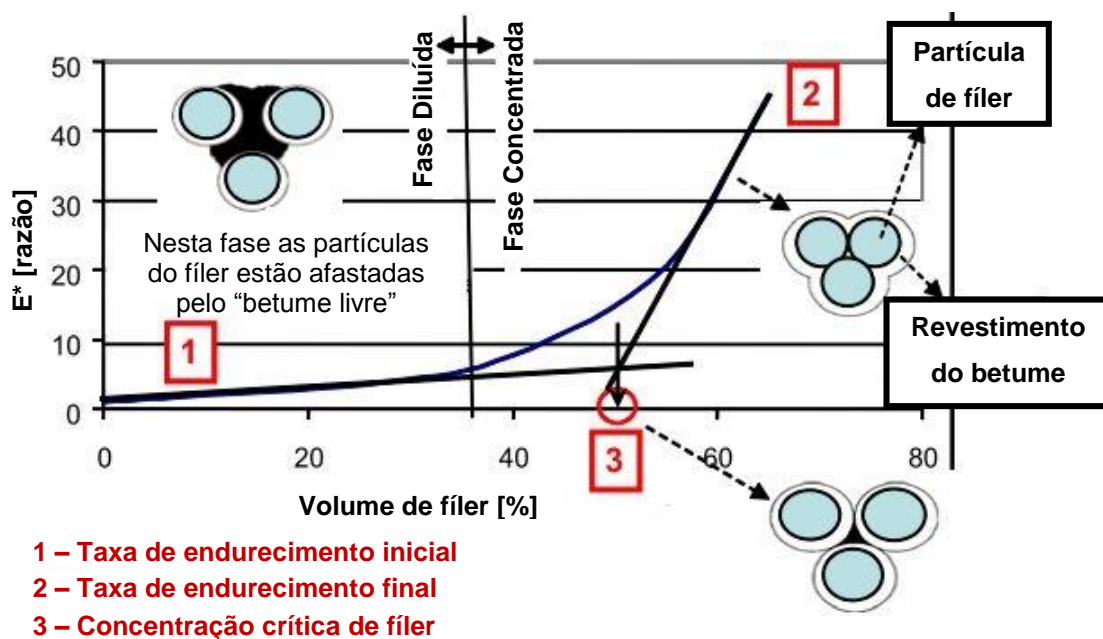


Figura 3.4 – Modelo esquemático para quantificar a o efeito do fíler do ligante (adaptado de Faheem e Bahia, 2009).

Mas recentemente o modelo utilizado foi melhorado introduzindo as propriedades do fíler como o índice de vazios de Rigden, a percentagem de óxido de cálcio, e o valor do azul-de-metileno (VAM), sendo eficaz para determinar módulo complexo do mástico em função do fíler (Faheem e Bahia, 2010).

Embora não existam dúvidas que o fíler tem grande influência no desempenho do mástico e da mistura betuminosa, várias especificações não fornecem muitas restrições sobre o mesmo, tendo requisitos simples. Foram identificadas as propriedades do fíler que mais alteram o desempenho da mistura. Estas são o índice de vazios Rigden, a dimensão das partículas, o teor de óxido de cálcio, o teor de argila ativa e a densidade relativa das partículas (NCHRP 9-45, 2010).

Relativamente às propriedades físicas e químicas dos fíleres recuperados utilizados, estas variam significativamente. Estes parecem influenciar as misturas usando um mecanismo físico-químico uniforme, sendo possível obter um modelo de previsão generalizado. O índice de vazios dos fíleres naturais varia claramente, uma vez que estes são recolhidos em pedreiras, sendo retirados dos coletores dos filtros de ar. Por outro lado, os fíleres comerciais mostram uma influência única sobre o mástico, não podendo ter uma fácil previsão, sendo necessário realizar um estudo próprio para cada um dos mesmos (NCHRP 9-45, 2010).

O mesmo estudo concluiu que a restrição da razão fíler/betume, em massa é insuficiente para garantir influência aceitável de cargas em mistura ou desempenho de mástico (NCHRP 9-45, 2010).

A influência das propriedades geométricas e físicas do fíler e a sua interação com o betume foi novamente estudada. Apesar de se concluir que todos os tipos de fíler demonstram uma boa adesão ao betume e nenhuma suscetibilidade a água, foram verificadas, através de imagens MEV (microscópio eletrónico de varrimento) e raio-x, as diferenças no tamanho, forma e texturas dos fíleres. Os dois tipos de cal (hidráulica e hidratada) são compostos de pequenas partículas granulosas e ásperas que tendem a aglomerar enquanto o cimento Portland e o fíleres minerais são compostos principalmente por partículas angulares com superfícies não muito rugosas.

A consistência e resistência dos mastiques levou ao destaque da cal hidratada, tendo sido com este fíler formulado o mástico com maior poder de rigidez que é explicado pela sua característica geométrica. Também a máxima razão a fíler/betume, obtida a partir da capacidade de absorção, mostra uma relação muito boa com o índice de vazios propondo a inclusão da mesma, nas especificações do fíler para servir como um valor de limitar a adicionar o agregado. (Antunes *et al.*, 2015).

Em Portugal, assistiu-se a alterações nas características do fíler que compõem a mistura betuminosa. As alterações foram levadas a cabo pela empresa Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2009) no âmbito da revisão do Caderno de Encargo Tipo Obra de 2009. Estas mudanças foram efetuadas com base no Caderno de Encargo Tipo Obra de 1998, da Junta Autónoma de Estradas (JAE, 1998). No Quadro 3.1 apresenta-se a evolução das especificações do fíler para as misturas betuminosas, podendo-se fazer uma comparação entre o caderno de encargo da JAE e o caderno de encargos da EP.

Quadro 3.1 – Evolução das especificações do fíler para as misturas betuminosas.

	Caderno de Encargos	
	JAE, 1998	EP, 2009
Fíler	• Granulometria (mm): 0,475 (100%); 0,180 (95-100%); 0,075 (75-100%).	• Granulometria (mm): 2 (100%); 0,125 (85-100%); 0,063 (70-100%).

3.3. Comportamento mecânico do mastique betuminoso

O mastique tem grande importância nas características de compactação e do teor ótimo do betume de uma mistura betuminosa, influenciando todos seus comportamentos. Assim a obtenção de um mastique com boas ligações entre o esqueleto mineral do fíler e o ligante betuminoso, proporciona um ganho nas propriedades mecânicas da mistura betuminosa (Bardini *et al.*, 2009).

O desempenho de um mastique betuminoso depende em grande parte do fíler. Quanto maior a irregularidade geométrica do agregados constituintes do fíler, maior a intensidade de adsorção, e por sua vez, maior a sua superfície específica. Este fator leva um aumento da viscosidade e da temperatura de amolecimento do mastique. Neste estudo também se verificou que, dentro da gama de fíleres utilizados, a cal-hidráulica revelou melhores características físico-químicas, dando origem a mastiques mais consistentes (Craus *et al.*, 1978).

Um dos fatores que mais influencia o comportamento do mastique é a matriz mineral do fíler, que independentemente da sua origem provoca um aumento significativo da rigidez e, por ser bastante fino, o fíler tem como principal finalidade o preenchimento dos vazios e o aumento da viscosidade do ligante, aumento da temperatura de amolecimento e diminuição da penetração.

A influência do fíler pode ser interpretada de duas formas, segundo (Santana, 1995):

- mastique com fíler total: segundo Ruiz, num mastique bem doseado, as partículas de fíler encontram-se em suspensão no betume, originando um mastique homogêneo;
- mastique com fíler ativo: segundo Puzinauskas, uma parte do fíler adota um comportamento de um agregado fino, formando um esqueleto mineral e a outra parte mantém-se em suspensão formando um mastique.

Contudo apesar da adição de fíler levar a um mastique mais consistente, o seu aumento significativo pode originar um mastique frágil a baixas temperatura. Se o fíler for poroso, esse efeito é ainda mais evidente (Kavussi e Hicks, 1997).

As interpretações também diferem com a introdução de fíler nos mastiques e, conseqüentemente, nas misturas betuminosas. Esta adição tem como objetivo reduzir os custos iniciais, para além de obter pavimentos com melhor desempenho, mais rígidos e com maior resistência às deformações impostas pela ação da temperatura. Isto é possível pois a introdução de fíler no mastique reduz a quantidade de ligante

betuminoso necessário para o preenchimento dos vazios existentes entre os agregados da mistura betuminosa, diminuindo assim o custo. Contudo, esta adição de fíler confere um comportamento mais plástico à mistura betuminosa (Chen e Peng, 1998).

Segundo outra ótica os mastiques com fíler de granulometria mais grossa têm melhor recuperação mecânica do que fíler com granulometria mais fina. Os autores concluem que os mastiques adquirem uma maior temperatura de amolecimento e permitem a previsão, a nível micro-estrutural, das misturas betuminosas (Smith e Hesp, 2000).

A interpretação de que o tamanho de fíler tem influência direta sobre o mastique é observada quanto menor o tamanho do fíler, maior a rigidez do mastique, uma vez que existe um maior envolvimento entre os diversos agregados do fíler e o betume. No mesmo estudo foram utilizados fileres de calcário, cimento Portland e pó de pedra. O calcário apresentou o menor tamanho de partícula e assim originou maiores valores de resistência à tração, superiores aos restantes tipos de fíler (Motta e Leite, 2000).

Outros autores estudaram vários tipos de fíler, entre os quais areia de campo, pó de pedra, pó calcário, cal hidratada, carbonato de magnésio e cimento Portland. Concluíram que aumentando o teor de fíler nas misturas betuminosas se traduz num aumento da resistência à tração. Assim a união entre o fíler e o ligante betuminoso conduz a uma maior consistência, rigidez e a resistência da mistura (Soares e Cavalcante, 2001).

O comportamento de mastiques com a utilização de dois tipos de ligantes betuminosos e quatro diferentes tipos de fíler (cal hidratada, cimento Portland, sílica e pó de calcário), foi ensaiado e permitiu concluir que o fíler de cal hidratada originou mastiques mais rígidos, provavelmente, devido a sua atividade superficial, maior superfície específica e irregularidade superficial. Os tipos de fíler de pó de calcário e sílica apresentaram comportamentos similares, tornando o mastique mais rígido quando misturado com um ligante betuminoso com menor índice de penetração (Bardini *et al.*, 2012).

Noutro estudo foram produzidos mastiques com dois tipos de betumes (com classes de penetração de 35/50 e 50/70 e posteriormente modificados com polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno)) e três tipos distintos de fíler (dois de calcário, com diferentes granulometrias, e um de cal hidráulica), para duas relações fíler/betume. Os resultados mostram que o comportamento do mastique é muito dependente da razão fíler-betume. Conclui-se que os mastiques com betumes 35/50 apresentaram maiores viscosidades, do que os mastiques com betume 50/70. Relativamente ao fíler, a cal hidráulica tem um poder de endurecimento muito elevado relativamente ao pó de calcário (Matos *et al.*, 2013).

À semelhança do fíler, a razão fíler/betume que compõe a mistura betuminosa sofreu alterações, levadas a cabo pela mesma empresa EP. No Quadro 3.2 apresenta-se a evolução das especificações da relação fíler/betume para as misturas betuminosas, podendo-se fazer uma comparação entre o Caderno de Encargo Tipo Obra da JAE e o Caderno de Encargo Tipo Obra da EP.

Quadro 3.2 - Evolução das especificações da relação fíler/betume para as misturas betuminosas.

Caderno de Encargos		
	JAE, 1998	EP, 2009
Relação fíler/betume	<ul style="list-style-type: none"> • Relação fíler/betume, em termos de massa, compreendida entre 1,1-1,5 ou 1,3-1,5, dependendo do tipo de mistura fabricada; • No caso de uma mistura que agregado granítico, a percentagem ponderal de fíler no agregado deve ser superior a 3%, que poderá ser reduzido para 2%, se o fíler utilizado for a cal hidráulica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Relação volumétrica fíler/betume, calculada através da equação (3.2), $\frac{f}{b} = \frac{(100 - IVR) \times \Delta T_{ab}}{1021,2 + \Delta T_{ab} \times IVR} \quad (3.1)$ <p>onde, f/b é a relação volumétrica de fíler/betume (%), IVR corresponde aos vazios do fíler seco compactado (índice de vazios de Rigden) (%), e ΔT_{ab} diz respeito ao aumento da temperatura de amolecimento anel e bola do mastique em relação ao betume que o originou (°C).</p>

A equação (3.2), desenvolvida no Centro de Investigação Rodoviário Belga (BRRC), deverá ser utilizada para valores ΔT_{ab} de 12°C e 16°C, uma vez que desta gama de temperaturas, o comportamento das misturas betuminosas é mais satisfatório.

No Quadro 3.3 são apresentados alguns valores das constantes do modelo 2S2P1D relativas a mastiques betuminosos. Pode verificar-se que os parâmetros k, h e λ , independente do tipo de fíler e da sua razão pouco alteram. Já os valores de E_0 , E_∞ e β sofrem grandes variações.

Quadro 3.3 – Resumo de valores das constantes do modelo 2S2P1D relativas aos mastiques betuminosos.

Fonte	Betume	Fíler	Razão f/b [Volume]	Tipo de Ensaio	E ₀ /G ₀ ⁽³⁾ [Pa]	E _∞ / G _∞ ⁽³⁾ [GPa]	k	h	α	λ	β
Di Benedetto (2004)	50/70	- ⁽¹⁾	0	Corte	0	2	0,20	0,56	2,5	1,6x10 ⁻⁴	400
			0,47		0	9	0,20	0,56	2,5	1,2x10 ⁻⁴	400
			0,92		0	20	0,20	0,56	2,5	1,6x10 ⁻⁴	400
	PMB		0		0,004	2	0,22	0,55	1,9	5,6x10 ⁻⁵	1500
			0,47		0,5	9	0,22	0,55	1,9	2,0x10 ⁻⁵	1500
			0,92		0,5	22	0,22	0,55	1,9	2,1x10 ⁻⁵	1500
Delaporte <i>et al.</i> (2009)	50/70	-	Uniaxial	0	0,9	0,21	0,55	2,3	1,0x10 ⁻⁴	400	
		Calcário		0,67	150	6	0,21	0,55	2,3	6,0x10 ⁻⁵	400
		Sílica ultrafina		0,67	200	70	0,21	0,55	2,3	6,0x10 ⁻⁵	1200
		Calcário + sílica ultrafina ⁽²⁾		0,67	500	5	0,21	0,55	2,3	5,0x10 ⁻⁴	30000
Yussof (2012)	100/150	Areia silicosa	Corte	600	4	0,21	0,55	4,0	1,1x10 ⁻⁴	250	
		Calcário		10	2	0,21	0,55	2,3	4,0x10 ⁻⁴	250	
		Cimento		120	2	0,21	0,55	2,3	3,0x10 ⁻⁴	250	

¹ – não é dada a informação da natureza do fíler utilizado no mastique betuminoso

² – as percentagens em volume de calcário e sílica ultrafina são, respetivamente, 66% e 33%

³ – para os ensaios de corte é o utilizado o valor do módulo complexo G_0/G_∞ e para os ensaios uniaxiais o valor de E_0/E_∞

4. Desenvolvimento experimental

4.1. Programa de ensaios

Todos os trabalhos experimentais efetuados para a concretização do desenvolvimento experimental deste trabalho foram realizados no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

Antes de definir as configurações dos ensaios a realizar, para caracterização do comportamento mecânico dos mastiques betuminosos, foi necessário definir quais os materiais e as razões fíler/betume a utilizar. Desta forma, foram utilizados dois tipos de betume: um betume puro 35/50 e um betume modificado (designado por PMB 45/80-65), obtido pela adição de polímeros (elastómeros termoplásticos) ao betume 35/50, sendo a sigla “PMB” proveniente da terminologia inglesa *Polymer Modified Bitumen*. Assim foram utilizados dois tipos de fíler: um pó de calcário e um fíler de cal hidráulica, que serão caracterizados no capítulo 4.2. Relativamente à razão fíler/betume (em massa) foram utilizadas três níveis: de 1,0; 1,32; 1,5. Utilizaram-se estas razões uma vez que são as mais utilizadas nos cadernos de encargos tipo obra em Portugal e de forma a comparar com outros trabalhos realizados. Em seguida fabricaram-se vários provetes de mastique betuminoso, com uma geometria cilíndrica com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. O fabrico dos mastiques será descrito no capítulo 4.3.

Os ensaios realizados foram adaptados da norma existente para as misturas betuminosas, nomeadamente EN 12697-26 (2004), para determinação do módulo complexo. Foram realizados dois tipos de ensaio cíclicos:

- Ensaio de compressão simples com aplicação de uma deformação imposta, reduzindo o comprimento inicial do provete;
- Ensaio de tração simples com aplicação de uma deformação imposta, aumentando o comprimento inicial do provete.

Para ambos os ensaios as deformações impostas foram de 0,1 e 0,2 mm. Utilizando estes valores assegura-se que o provete está longe de atingir a rotura, garantindo sempre um comportamento viscoelástico linear. A Figura 4.1 descreve esquematicamente os ensaios realizados.

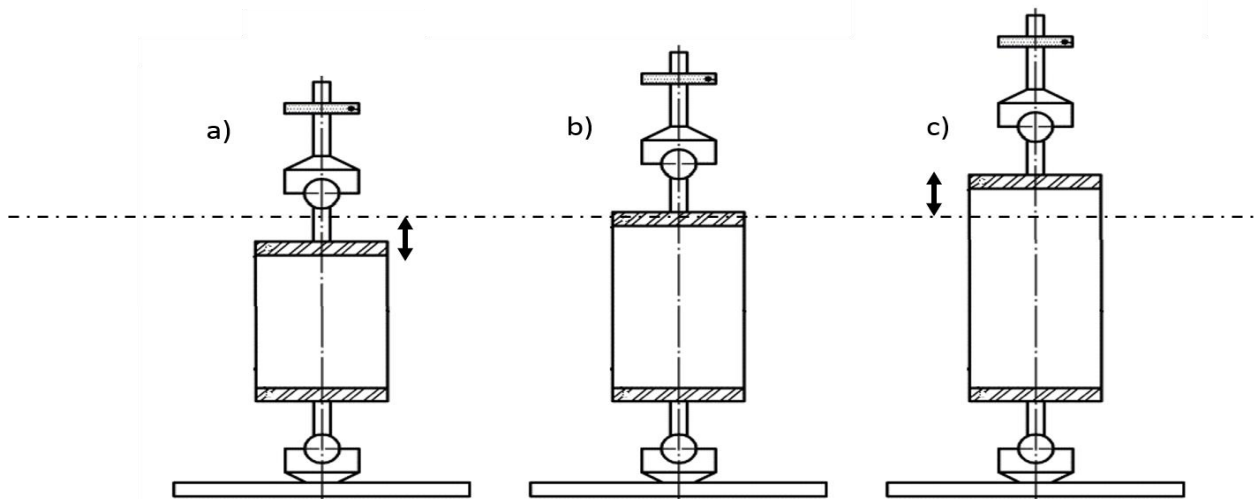


Figura 4.1 - Esquema de ensaios: ensaio cíclico de compressão simples (a), posição inicial do provete (b), ensaio cíclico de tração simples (c) (adaptado NCHRP Project 9-29)

O mastique é extremamente sensível à temperatura mais altas e a baixas frequências, aumentando a sua deformabilidade. Foram realizados ensaios a temperaturas superiores a 25°C e constatou-se que o provete, com o decorrer do ensaio, viria a perder as suas características geométricas (Figura 4.2). Desta forma, a opção tomada foi utilizar temperaturas de 20°C e 25°C, sendo que para a temperatura mais elevada é necessário utilizar uma câmara de aquecimento para controlo da temperatura.



Figura 4.2 – Provete de mastique betuminoso durante um ensaio de compressão simples a 35°C.

As velocidades utilizadas foram de 0,005, 0,01, 0,02 e 0,08 mm/seg., com frequências a variar entre 0,01 e 0,17 Hz. Foram utilizadas estas velocidades, e as respectivas frequências, devido a algumas restrições do equipamento de ensaio mecânico. Este equipamento para deformações de 0,1 e 0,2 mm não consegue alcançar velocidades de ensaio superiores a 0,08 mm/seg.

Desta forma estão definidos todos os parâmetros necessários para a realização dos ensaios. Devido à grande quantidade de parâmetros necessários para definir o mastique a ensaiar, foi formulada seguinte terminologia:

- **P|1|L|0,1|25|C|0,08** - **P** de 35/50; **1** de razão fíler/betume; **L** de calcário; **0,1** mm de deformação imposta; **25**°C a temperatura de ensaio; **C** de ensaio de compressão simples; **0,08** mm/seg. a velocidade de ensaio.

No Quadro 4.1 apresenta-se uma síntese de todos os parâmetros e siglas utilizadas.

Quadro 4.1 – Síntese de todos os parâmetros e siglas.

Parâmetro	Configuração de ensaio	Sigla
Betume	35/50 ou PMB	P ou M
Razão fíler/betume [massa]	1, 1,32 ou 1,5	1 , 1,32 ou 1,5
Fíler	Calcário ou cal hidráulica	L ou H
Deformação imposta	0,1 ou 0,2 mm	0,1 ou 0,2
Temperatura do ensaio	20°C ou 25°C	20 ou 25
Tipo de ensaio	Compressão simples ou tração simples	C ou T
Velocidade do ensaio	0,005, 0,01, 0,02 ou 0,08 mm/seg.	0,005 , 0,01 , 0,02 ou 0,08

Antes do início de cada ensaio, ficou garantido que os provetes atingiam um estado de equilíbrio térmico, deixando-os à temperatura de ensaio durante um período de 60 minutos. Os ensaios foram realizados durante onze ciclos de forma a garantir uma estabilização de comportamento do provete. Desconsiderou-se o primeiro ciclo dado que corresponde ao período de arranque. Após a realização dos ensaios são recolhidos os valores da força exercida e da deformação apresentada pelo provete, durante o tempo do ensaio. De salientar que para cada tipo de mastique com um determinado tipo de betume, fíler e razão fíler/betume foram fabricados três provetes, permitindo um melhor rigor nos resultados obtidos. No total foram ensaiados 36 provetes. A Figura 4.3 mostra os ensaios do mastique a 20°C (a) e 25°C (b), o mecanismo de ensaio (Zwick) e a câmara de aquecimento para controlo de temperatura.

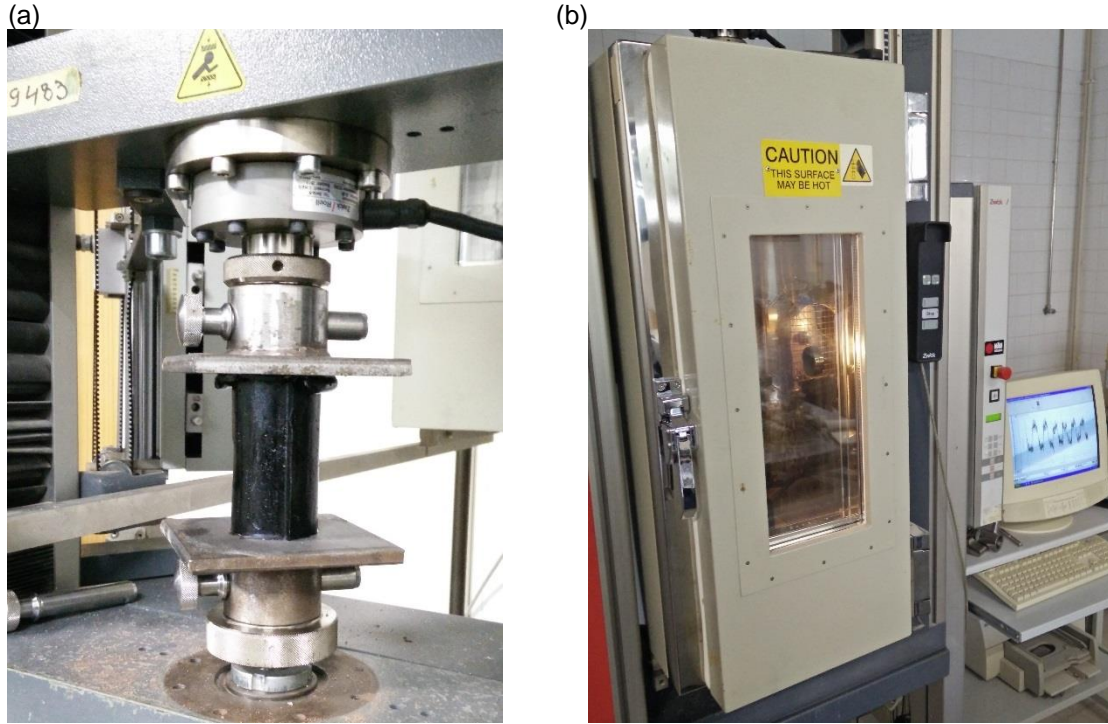


Figura 4.3 – Ensaios do mástico a 20 °C (a) e 25 °C (b), o mecanismo de ensaio (Zwick) e a câmara de aquecimento para controlo de temperatura.

Para a obtenção do valor do módulo complexo e do valor do ângulo de fase utilizou-se uma regressão linear do estudo NCHRP 9-29 (2001). Este estudo é conhecido por ser o método dos mínimos quadrados, sendo o mais simples e direto para calcular esses parâmetros de forma mais exata.

Numa primeira fase os dados para cada transdutor são centrados, subtraindo a média do transdutor do valor obtido em

$$Y'_{ji} = Y_{ij} - \bar{Y}_j \quad (4.1)$$

onde Y'_{ji} é o valor centrado para o transdutor j para o tempo i , Y_{ij} o valor do transdutor para o tempo i e \bar{Y}_j média para o transdutor j .

O segundo passo do procedimento constrói-se a matriz $[X' X]$ como se mostra seguidamente:

$$[X' X] = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i \cos(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \sin(\omega_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \cos(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos^2(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) \sin(\omega_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \sin(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) \sin(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \sin^2(\omega_0 t_i) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

onde n é o numero total de valores do ensaio, ω_0 é a frequência angular e t_i é o tempo de cada valor de ensaio. Para cada transdutor é construída uma matriz como a apresentada em baixo:

$$[X'Y_j] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_{ji}' \\ \sum_{i=1}^n Y_{ji}t' \\ \sum_{i=1}^n Y_{ji}' \cos(\omega_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n Y_{ji}' \sin(\omega_0 t_i) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A coluna com os coeficientes de regressão para cada transdutor é calculada multiplicando a inversa da matriz $[X'X]$ pela matriz $[X'Y_j]$, como se pode ver de seguida:

$$\begin{bmatrix} A_{j0} \\ A_{j1} \\ A_{j2} \end{bmatrix} = [X'X]^{-1} [X'Y_j] \quad (4.4)$$

Por fim, a equação determina os valores para cada transdutor:

$$\hat{Y}_{j0} = A_{j0} + A_{j1}t_i + A_{j2} \cos(\omega_0 t_i) + B_{j2} \sin(\omega_0 t_i) + \varepsilon_{ji} \quad (4.5)$$

onde \hat{Y}_{j0} é o valor esperado para o transdutor j e ε_{ji} o termo do erro da regressão.

Na Figura 4.4 apresenta-se um exemplo de uma regressão linear para a variação da força para um provete de mastique M|1,5|H|0,1|25|C|0,08 ensaiado. De seguida realizou-se uma regressão linear para a variação do deslocamento do tempo. Na Figura 4.5 apresenta-se o resultado destas duas regressões, num gráfico força/deslocamento.

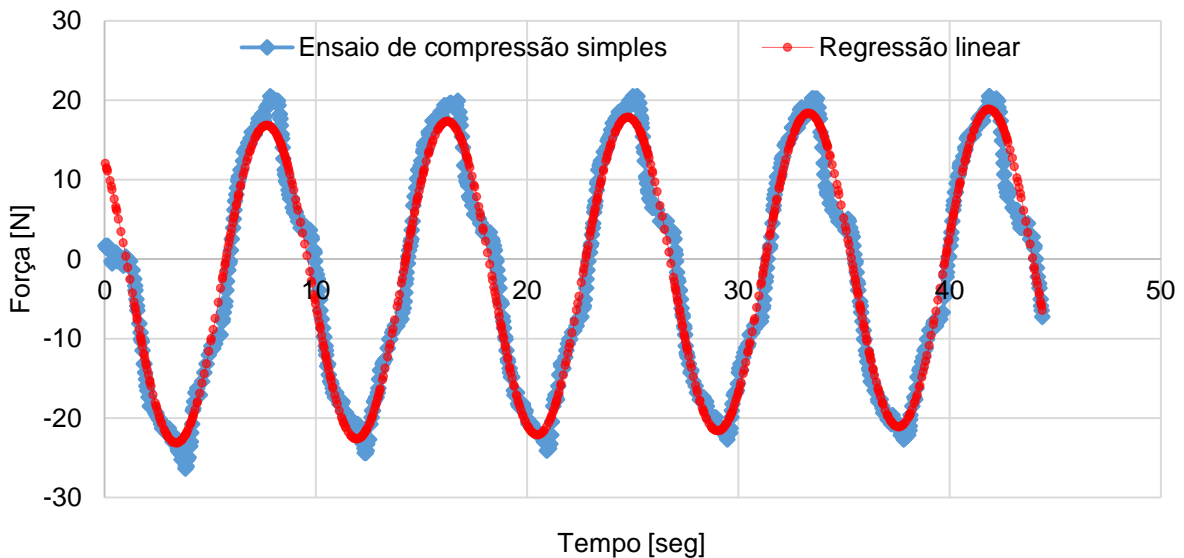


Figura 4.4 - Exemplo de uma regressão linear tempo/força para o mastique M|1,5|H|0,1|25|C|0,08.

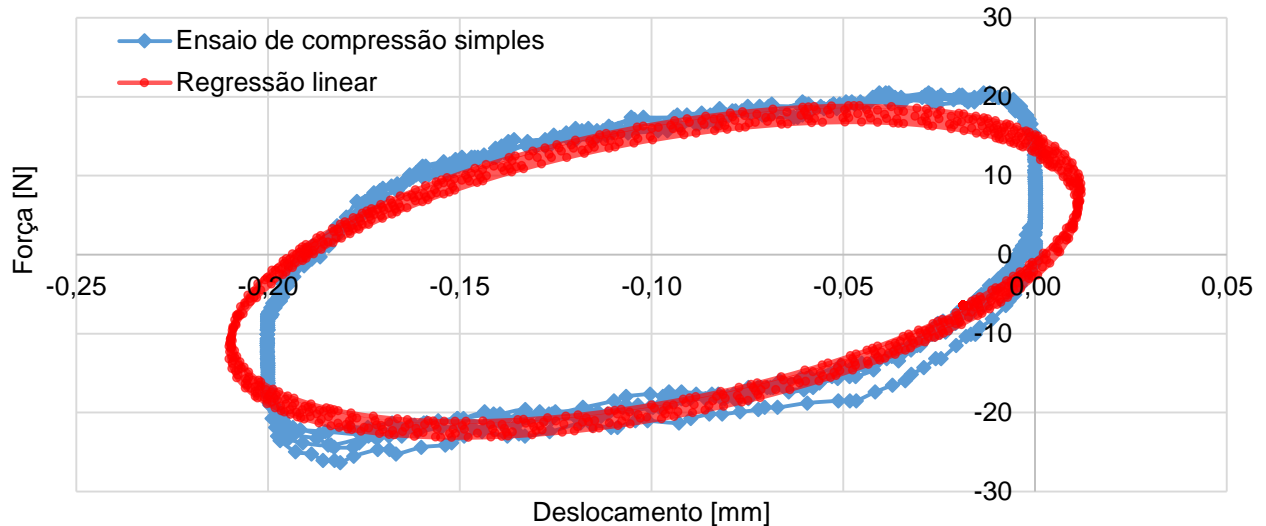


Figura 4.5 - Exemplo de um gráfico deslocamento/força para o mastique M|1,5|H|0,1|25|C|0,08, após regressão linear.

Com base nas regressões lineares são obtidos os valores de ΔF_0 , t_0 e h_0 . Com estes valores é possível calcular o módulo complexo através da seguinte equação:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \frac{F_0 \times \Delta h_0}{A \times h} \quad (4.5)$$

onde $F_0 = \sqrt{A^2 + B^2}$ e $\Delta h_0 = \sqrt{a^2 + b^2}$, sendo A e B constantes da regressão linear para a força, e a e b constantes da regressão linear para o deslocamento.

Para calcular os valores de ângulo de fase utilizou-se a seguinte equação:

$$\varphi = |\varphi_\sigma - \varphi_\varepsilon| = \left[\arctang \left(\frac{B}{A} \right) \right] - \left[\arctang \left(\frac{b}{a} \right) \right] \quad (4.6)$$

Alcançados os valores do módulo complexo e do ângulo de fase dos três provetes de cada tipo de mastique, e de cada tipologia ensaiada, foram conseguidos 1152 resultados. De seguida foi calculada uma média ponderada obtendo assim um valor final dos mesmos, perfazendo 384 resultados médios.

Na Figura 4.6 é exposto um diagrama parcial onde são apresentados os tipos de betume, de fíler e as razões fíler/betume utilizados nos ensaios. No Anexo A será apresentado um diagrama total com todas as variáveis utilizadas.

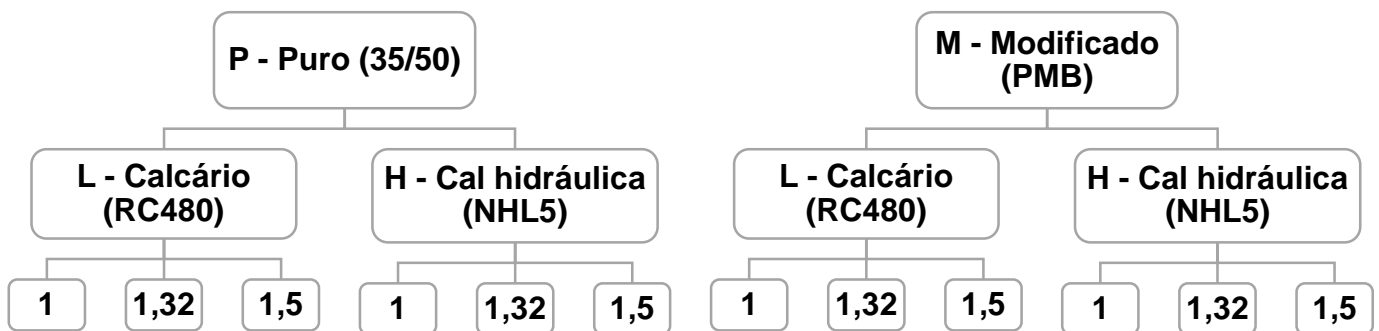


Figura 4.6 – Diagrama parcial com os tipos de betume, fíler e razões fíler/betume utilizado e as diversas combinações.

4.2. Caracterização do ligante betuminoso e do fíler

Como referido anteriormente utilizaram-se dois tipos de betume, o betume puro 35/50 e o betume modificado PMB 45/80-65, ambos cedidos pela empresa Probigalp. No Quadro 4.2 indicam-se as suas principais propriedades.

De salientar que o betume 35/50 é um dos betumes mais utilizados em misturas betuminosas em Portugal. Contudo de forma a melhorar as características deste ligante, devido às solicitações que o aumento do tráfego provoca no pavimento, procuraram-se alternativas. Isto levou à adição de polímeros solúveis que amolecem por ação do calor podendo ser moldados de forma reversível (termoplásticos) e polímeros lineares que, submetidos a um processo de vulcanização, adquirem uma estrutura parcialmente reticulada, conferindo-lhes as suas propriedades elásticas (elastómeros). Em suma, são adicionadas borrachas provenientes, maioritariamente, da indústria de pneus, originando o betume modificado PMB (Probigalp, 2014)

Ambos os betumes foram fornecidos numa lata metálica de 20 litros de capacidade. As latas foram armazenadas à temperatura ambiente até serem utilizadas para a preparação de sub-amostras, como vai ser explicado no subcapítulo 4.3.

No anexo B apresentam-se os certificados de qualidade dos betumes em estudo.

Quadro 4.2 - Principais propriedades dos betumes utilizados no fabrico dos mastiques betuminosos.

Método	Propriedade [Condições de ensaio]	Betume	
		P (35/50)	M (PMB 45/80-65)
EN 1426:2007	Penetração [25°C, 100g, 5s] (0,1 mm)	43	51
EN 1427:2007	Temperatura de amolecimento (°C)	51	70,4

Relativamente aos fíleres usados para o fabrico dos vários mastiques betuminosos, foram utilizados dois tipos de fíler. O fíler calcário (RC480), oriundo da empresa Eurocálcio, e o fíler de cal hidráulica (NHL5) da empresa Secil. No Quadro 4.3 apresentam-se as principais características usadas como referência durante a execução do trabalho experimental.

No Anexo C, expõem-se as fichas técnicas dos fíleres cedidos pelos fornecedores.

Quadro 4.3 – Principais características dos fíleres utilizados no fabrico dos mastiques betuminosos.

Fíler	Granulometria (% dos passados em massa)			Massa Volúmica [Mg/m³]	Índice de vazios de Rigden [%]
	2 mm	0,125 mm	0,063 mm		
H (NHL5)	100-100	100-90	85-75	2,70-2,90	28-45
L (RC480)	100-100	100-98	88,5-78,5	2,71	32

Estes dois tipos de fíler foram os escolhidos para o fabrico dos mastiques betuminosos, não só por serem de utilização corrente nos pavimentos rodoviários em Portugal, mas por terem origens diferentes. A cal hidráulica, fíler produzida segundo um processo controlado e o pó de calcário, fíler proveniente dos filtros do ar do processo de britagem de agregados grossos.

Na Figura 4.7 são apresentados os dois tipos de fíler utilizados: cal hidráulica (NHL5) e pó de calcário (RC480).

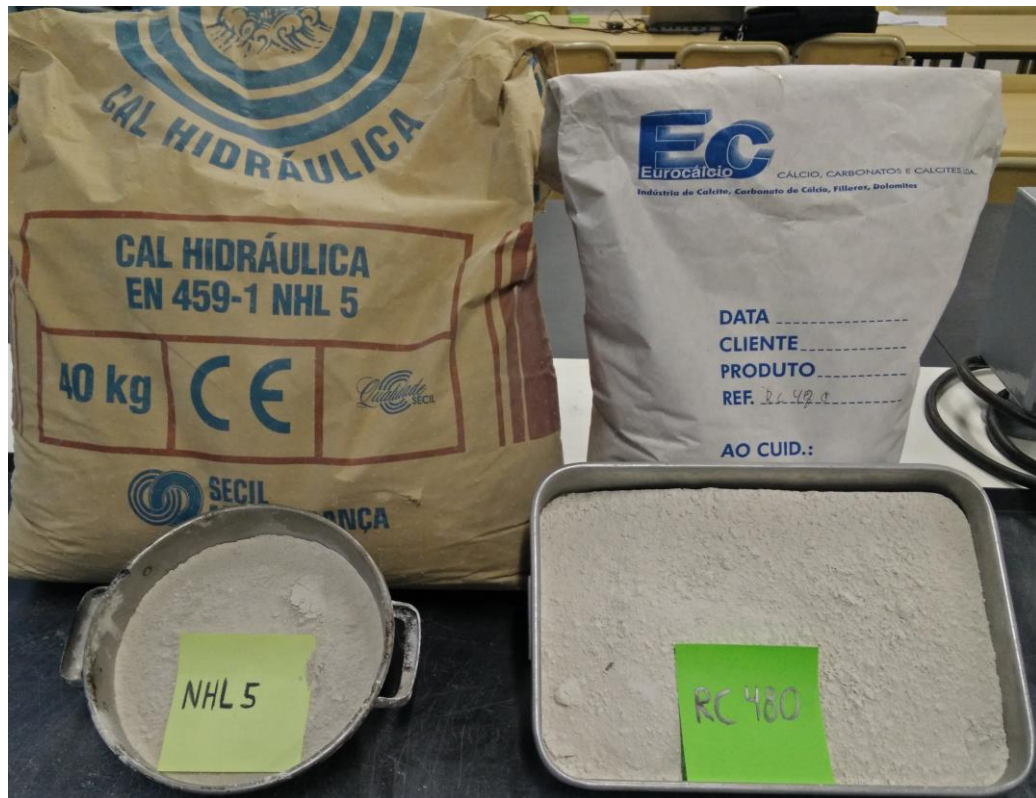


Figura 4.7 – Fíler de cal hidráulica (NHL5) e pó de calcário (RC480).

4.3. Preparação dos provetes para os ensaios compressão e tração simples

Antes da preparação dos provetes de mastique betuminoso utilizados nos ensaios, procedeu-se a uma preparação de sub-amostras de betume, uma vez que este foi dispensado em latas de 20 litros. De seguida será descrito, em pormenor, todos os processos.

4.3.1. Preparação de sub-amostras de betume

Nesta subdivisão, as latas de betume de 20 litros, com características distintas, são divididas em amostras de menor dimensão: latas de grande, de média e de pequena dimensão. Assim será descrito o procedimento para a lata de betume puro 35/50, tendo como base a norma NP EN 12594 (2009), para amostras com mais de 5 litros.

A lata de betume foi aberta, deixando a tampa solta, e colocada na estufa durante 14 horas a uma temperatura de fusão do material de 50°C acima da temperatura de anel e bola (50°C), ou seja, a 100°C. Findo esse tempo, a temperatura de fusão foi aumentada para 85±5°C acima da temperatura de amolecimento (50°C), adotando uma temperatura de 140 °C durante 2 horas.

Retirou-se a lata da estufa e homogeneizou-se manualmente e cuidadosamente o betume recorrendo a um utensílio próprio durante alguns minutos, de modo a impedir a formação de bolhas de ar.

Por fim, verteu-se o betume nas latas de dimensões decrescentes, ou seja, primeiro verteu-se para as latas de maiores dimensões (grandes) e depois para as de menores dimensões (médias e pequenas), com indicação prévia da altura de preenchimento máximo.

Posteriormente, identificaram-se as latas e colocou-se folhas de alumínio a cobrir as duas faces.

De acordo com a norma NP EN 12594 (2009), a temperatura não deverá exceder os 200°C, independentemente do tipo de betume (seja ele puro ou modificado). Segundo a mesma, não é recomendável a reutilização de amostras remanescentes do aquecimento, sendo contudo necessário, devido às elevadas dimensões da lata de 20 litros, subdividir em latas grandes.

Para as latas grandes fundiu-se o betume durante 3 horas a 100°C, e depois aqueceu-se durante 2 horas a 140°C, sendo que para as restantes latas se aqueceu o betume durante 1 hora a 140°C.

Para o betume modificado PMB 45/80-65 o procedimento é semelhante, mas para este foram utilizadas as temperaturas de 120°C e 160°C, respetivamente. Na Figura 4.8 mostram-se as sub-amostras dos dois betumes utilizados.



Figura 4.8 – Sub-amostras em latas grandes, médias e pequenas de betume modificado (PMB 45/80-65) e betume puro (35/50).

4.3.2. *Fabrico do mastique betuminoso*

No que diz respeito ao fabrico dos mastiques betuminosos, este procedimento tem como base as normas NP EN 12594 (2009) e EN 14770 (2012). Os provetes têm uma geometria cilíndrica, com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro.

Uma vez escolhidos os materiais e a razão fíler/betume a utilizar, estimou-se as quantidades dos mesmos e colocou-se na estufa pré-aquecida durante 1 hora, a uma temperatura de 140°C para betume puro 35/50 e 160°C para betume modificado.

Ao fim de 1 hora na estufa, os materiais foram pesados, verificando as quantidades necessárias para formar a mistura. Primeiro verteu-se o betume e só depois o fíler necessário (Figura 4.9 – a).

Aqueceu-se, previamente, a placa de aquecimento e colocou-se o recipiente da mistura com os materiais já doseados. Misturou-se (Figura 4.9 – b), até obter uma mistura homogénea (Figura 4.10).

Depois de se obter a mistura de mástique bem homogeneizada, colocou-se novamente na estufa durante aproximadamente 10 minutos.

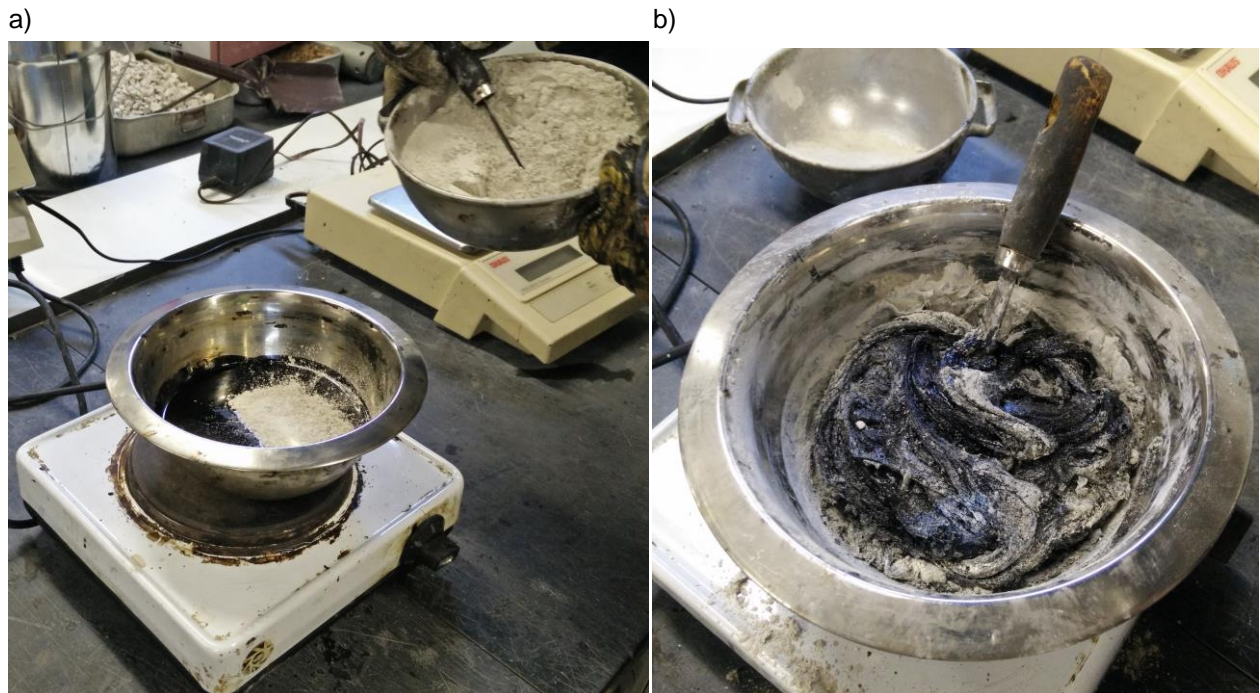


Figura 4.9 – Fases do processo de fabrico do mastique betuminoso: a) fase inicial, onde é introduzido fíler calcário ao betume puro e (b) fase intermédia, onde se inicia a mistura do betume e do fíler.



Figura 4.10 – Fase final do processo de fabrico do mastique betuminoso, onde é obtida uma mistura homogeneizada.

4.3.3. Preparação dos provetes de ensaio

A mistura de mastique betuminoso foi colocada no molde cilíndrico metálico (Figura 4.11 – a), aparafusando-se as duas faces e colocando no suporte. Para uma fácil desmoldagem, o molde metálico foi lubrificado com glicerina, funcionando como descofrante.

Assim, verteu-se a mistura lentamente até ao topo do molde (Figura 4.11 – b) e deixou-se arrefecer a mesma durante aproximadamente 15 minutos e colocou-se na câmara frigorífica. Ao fim de 90 minutos o molde foi retirado e removeram-se as faces do mesmo, obtendo o provete cilíndrico com as dimensões desejadas. De forma a evitar a deformação do provete, este foi colocado novamente na câmara frigorífica, estando pronto para ser colado.

Posteriormente foram preparados dois suportes metálicos (Figura 4.12 - a) aos quais o provete é fixado. Para este efeito os suportes foram colocados na estufa pré-aquecida, onde permaneceram durante 15 minutos. Após serem retirados da estufa, os suportes possuem uma temperatura superior à temperatura ambiente, o que favorece a sua limpeza e ajuda a uma melhor ligação entre a cola aplicada e o provete. A Araldite (Figura 4.12 – b), cola utilizada neste processo, foi aplicada nas duas faces do provete e nos dois suportes metálicos, sendo colocado o provete no centro dos suportes.

Ao fim de 30 minutos o provete foi colocado novamente na câmara frigorífica onde permanece durante 8 horas, estando apto para ser ensaiado.

(a)



(b)



Figura 4.11 - Materiais utilizados na preparação dos provetes: (a) molde cilíndrico metálico e (b) molde cilíndrico metálico a ser preenchido por mástico betuminoso.

(a)



(b)



Figura 4.12 – Materiais utilizados na preparação dos provetes para ensaio: (a) suporte metálico onde o provete é colado e ensaiado (b) cola Araldite utilizada para colagem dos provetes.

4.4. Apresentação e discussão de resultados

Para os ensaios de todos os provetes, os valores médios obtidos do módulo complexo e do ângulo de fase correspondente, são apresentados no Anexo D, para os mastiques com betume puro 35/50 (P) e no Anexo E, para mastiques com betume modificado PMB (M).

Nas secções seguintes serão discutidos os resultados obtidos.

4.4.1. Influência do tipo de ensaio

As Figuras 4.13 a 4.16 visam avaliar se o tipo de ensaio tem influência nos valores do módulo complexo. Nestas figuras são comparados os valores do módulo complexo obtido no ensaio cíclico uniaxial à compressão e o módulo complexo obtido no ensaio cíclico uniaxial à tração, com as mesmas condicionantes (velocidades, temperaturas, razões fíler/betume e deformações impostas). Estes mastiques foram agrupados pelo tipo de fíler e pelo betume utilizado. Também é apresentada a regressão linear de grupo de mastiques, bem como a sua equação e o coeficiente de determinação (R^2).

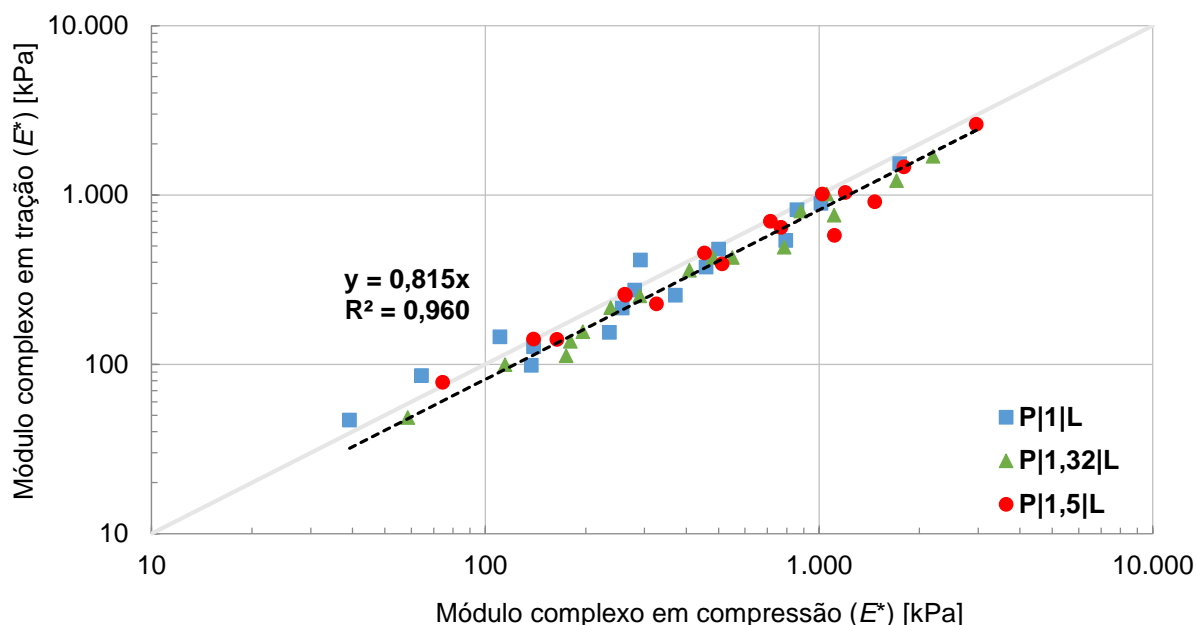


Figura 4.13 – Efeito do tipo de ensaio cíclico uniaxial no valor do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L).

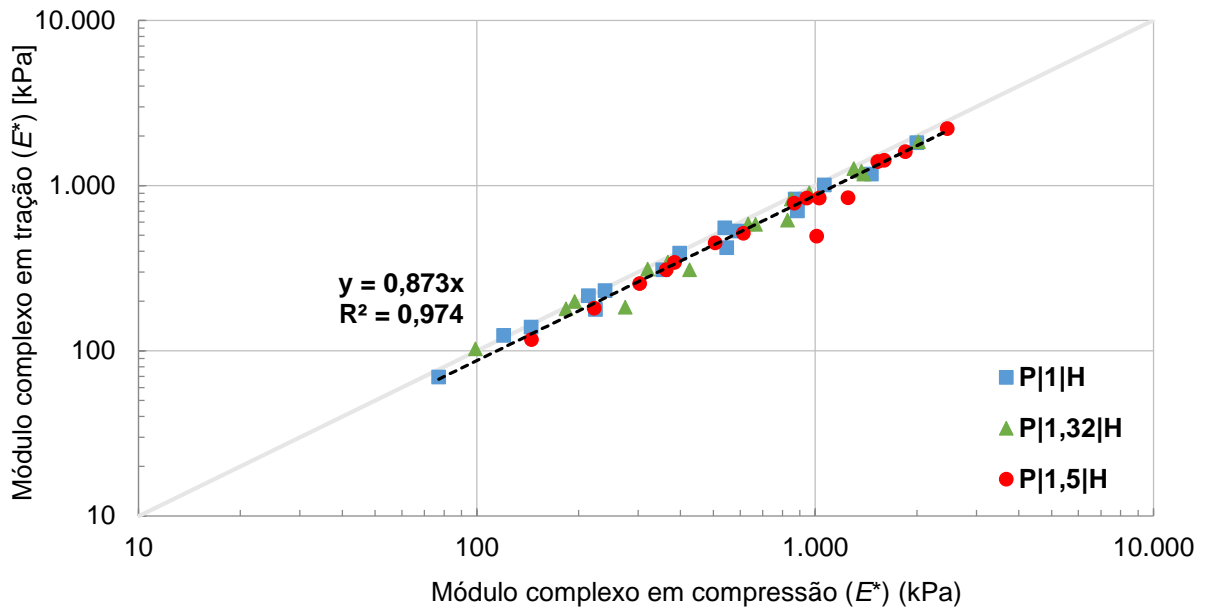


Figura 4.14 - Efeito do tipo de ensaio cíclico uniaxial no valor do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e filler de cal hidráulica (H).

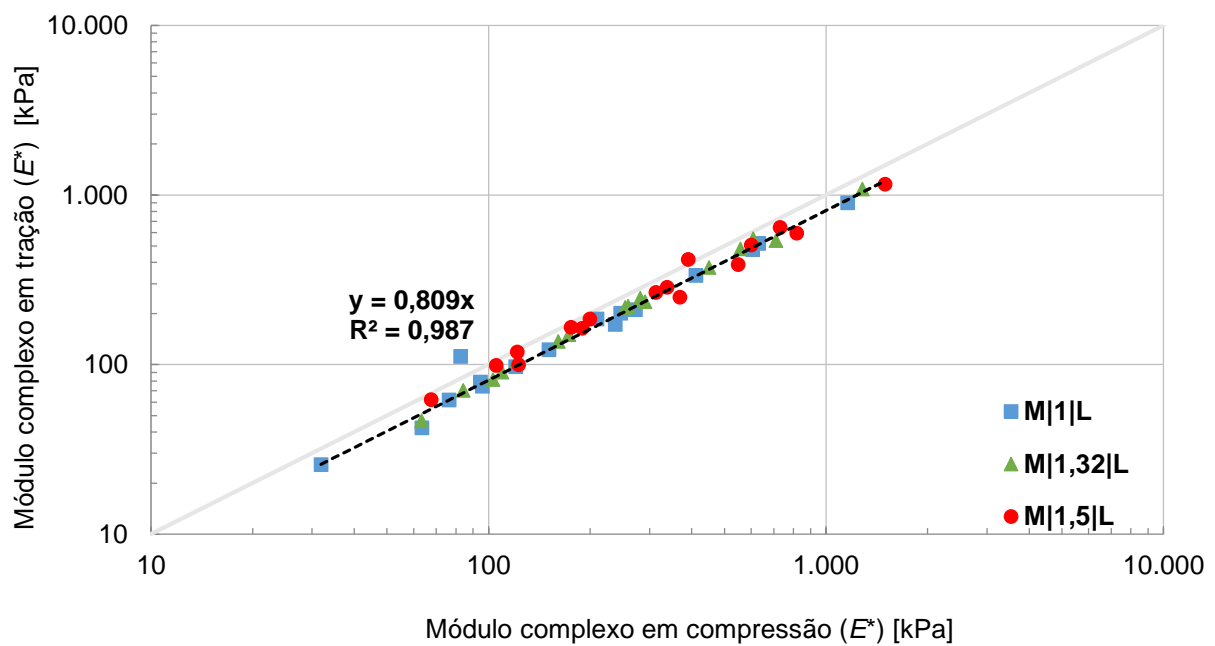


Figura 4.15 - Efeito do tipo de ensaio cíclico uniaxial no valor do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).

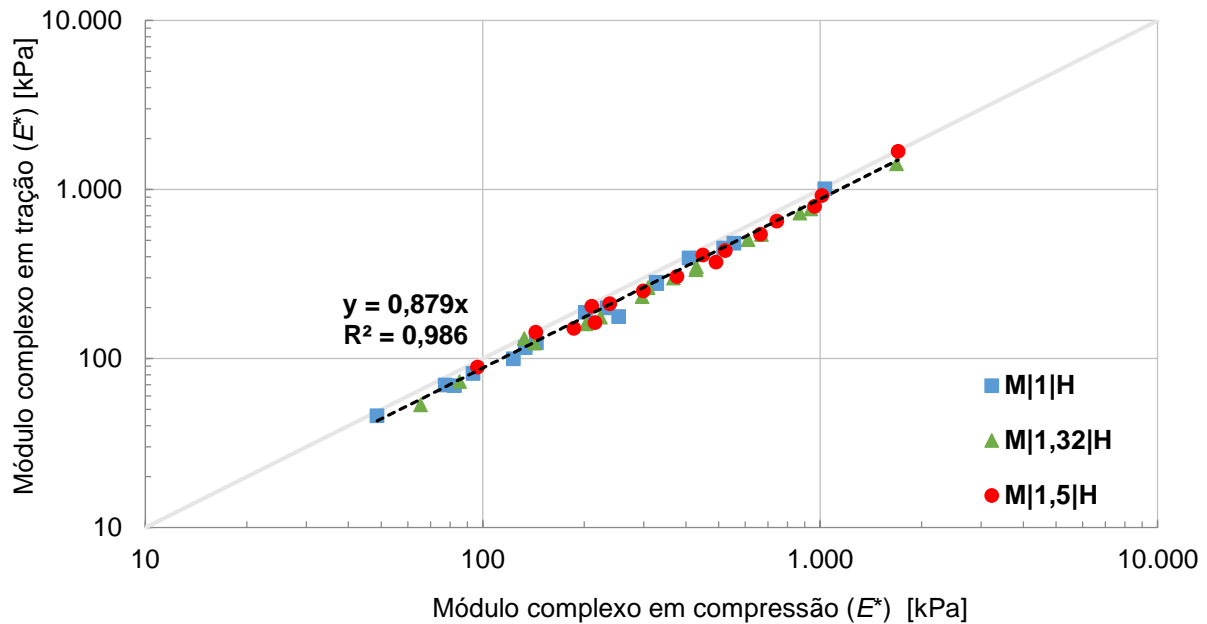


Figura 4.16 - Efeito do tipo de ensaio cíclico uniaxial no valor do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e filer de cal hidráulica (H).

A partir das representações anteriores é possível verificar que os valores do módulo complexo sofrem uma variação pouco significativa com a alteração do tipo de ensaio, tanto para o betume puro como para o betume modificado.

Contudo, o ensaio cíclico uniaxial de compressão tem valores de módulo complexo superiores aos valores obtidos no ensaio de tração. Esses valores, apesar de uma diferença mínima, são mais evidenciados quando os mastiques contêm na sua formulação o pó de calcário. A diferença de valor do módulo complexo pode ser expressa pela equação da regressão linear apresentada nas figuras, sendo possível verificar que esta tem um ótimo ajuste às amostras de valores utilizados, evidenciando o betume modificado e o filer de cal hidráulica o menor efeito do tipo de ensaio. De salientar que, à medida que a dosagem de filer aumenta em cada mastique, o valor do módulo complexo também aumenta.

4.4.2. Influência da amplitude da deformação imposta

A influência da aplicação de uma deformação imposta de 0,1 ou 0,2 mm no valor do módulo complexo, foi analisada a partir de isócronas do módulo complexo correspondentes às temperaturas de 20°C e 25°C, para uma razão filer/betume de 1,5, tanto para o pó de calcário como para a cal hidráulica (Figuras 4.17 a 4.20). Os mastiques foram agrupados pelo tipo de betume e filer utilizado na mistura, bem como a temperatura de ensaio. As restantes razões de filer/betume serão apresentadas no Anexo F.

De salientar que, para estas isócronas, apenas se utilizaram os valores do módulo complexo de ensaios cíclicos uniaxiais à compressão simples.

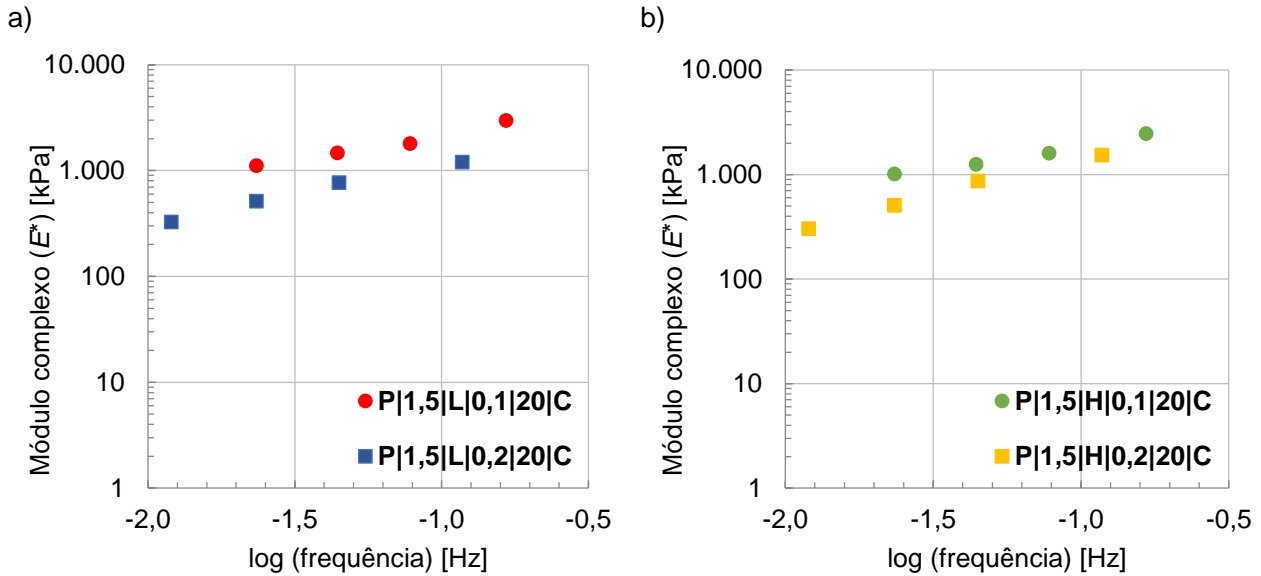


Figura 4.17 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 20°C, com razão f/b de 1,5 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).

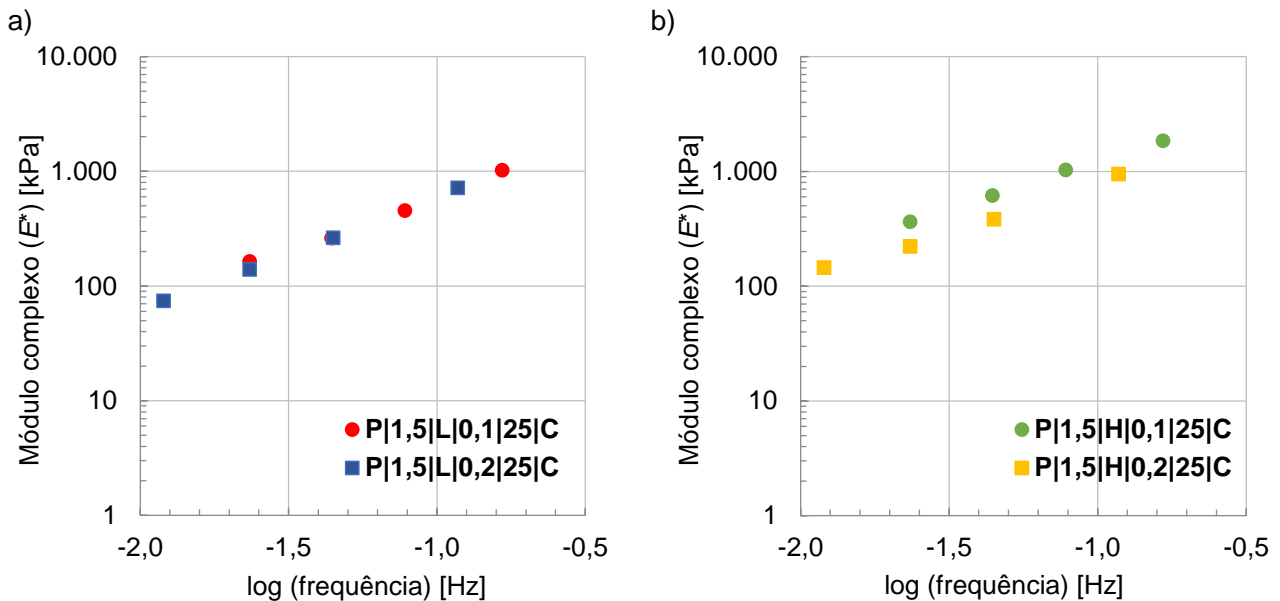


Figura 4.18 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 25°C, com razão f/b de 1,5 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).

Relativamente aos mastiques com betume puro constata-se que não existe uma grande variação do módulo complexo quando são impostas as duas amplitudes de deformação. Contudo, para a menor deformação imposta, 0,1 mm, os resultados indicam que o valor do módulo complexo é ligeiramente superior. Verifica-se que quando é o utilizado o fíler calcário, e a temperatura é mais baixa, as variações são mais relevantes (Figura 4.17 – a). O mesmo foi verificado para as restantes razões fíler/betume apresentadas em anexo. A única exceção é quando o mástico é composto por uma razão fíler/betume de 1 e a 25°C (Figura F.2 – a).

Em geral, as duas amplitudes de deformação imposta utilizadas neste programa experimental mostram uma evolução gradual do valor do módulo complexo com o aumento da frequência.

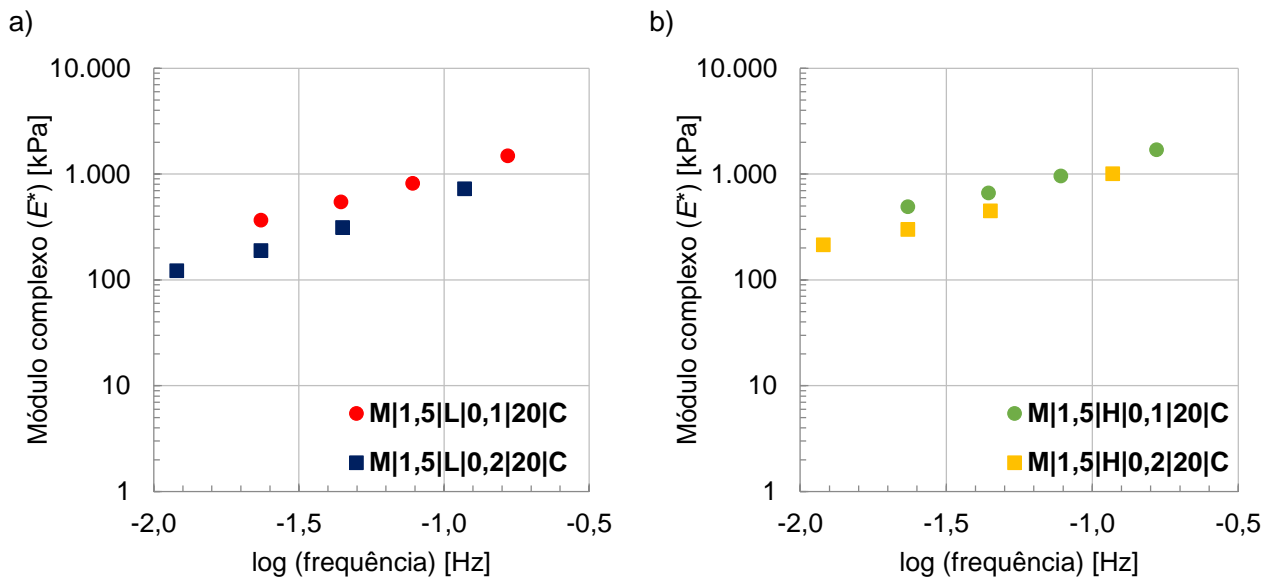


Figura 4.19– Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 20°C, com razão f/b de 1,5 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).

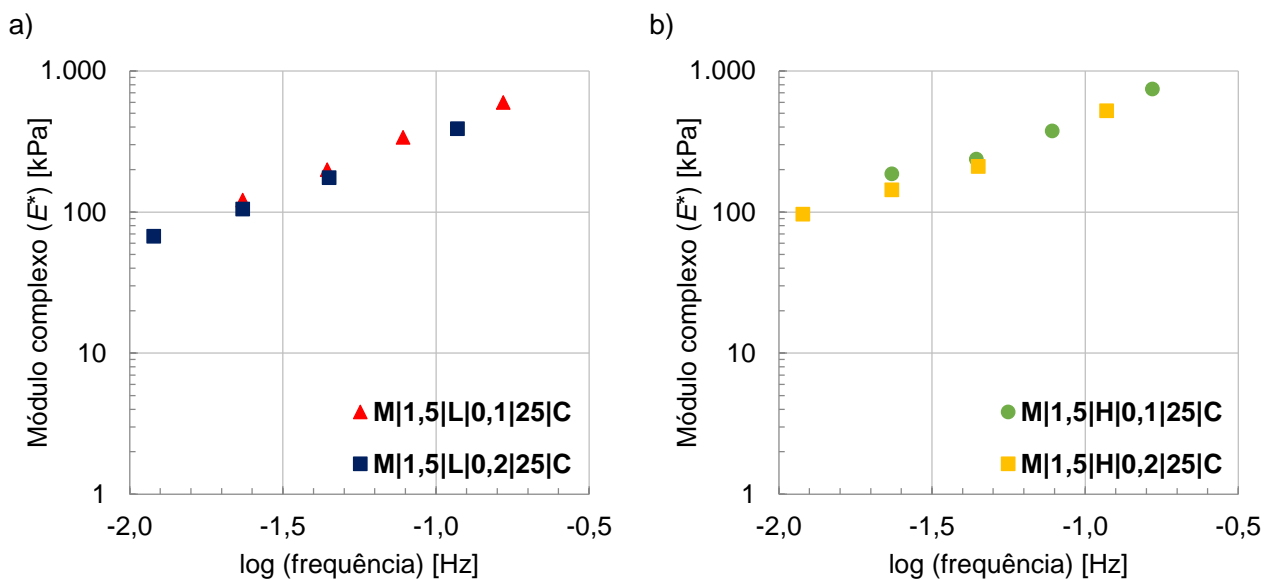


Figura 4.20 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 25°C, com razão f/b de 1,5 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).

Relativamente aos mastiques com betume modificado é possível verificar que a variação ainda é menor, em comparação com os mastiques com betume puro. Os valores do módulo complexo para a menor deformação imposta, 0,1 mm, continuam a ser ligeiramente superiores. Verifica-se que para as temperaturas mais baixas, e independentemente do fíler, essa variação é mais perceptível (Figura 4.19). O comportamento dos restantes mastiques, com dosagem diferentes de fíler, é semelhante. Estes mastiques também mostram uma evolução gradual do valor do módulo complexo com o aumento da frequência.

4.4.3. Influência da temperatura

De forma análoga, ao tipo de ensaio, a variação do módulo complexo com a temperatura foi analisada a partir das representações apresentadas nas Figuras 4.21 a 4.24. Nesta figuras apresenta-se a comparação entre o módulo complexo obtido a 20°C e a 25°C com as mesmas velocidades, tipos de ensaio, razões fíler/betume e deformações impostas. Estas foram agrupados pelo tipo de fíler e pelo betume utilizado. Também é apresentada a regressão linear de grupo de mastiques, bem como a sua equação e o coeficiente de determinação (R^2).

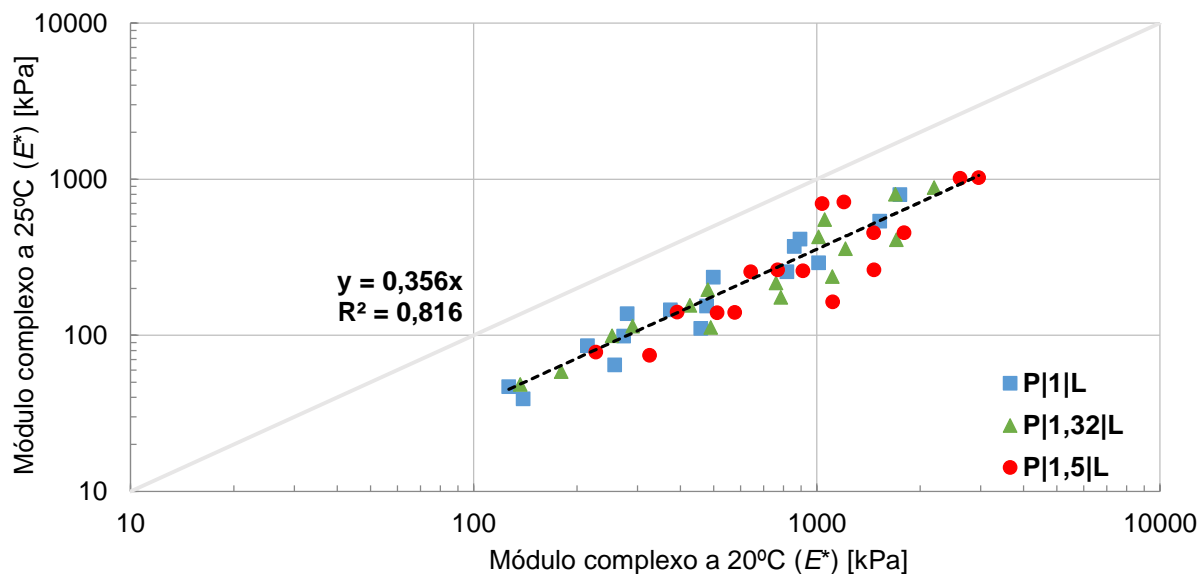


Figura 4.21 - Efeito da temperatura no módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L).

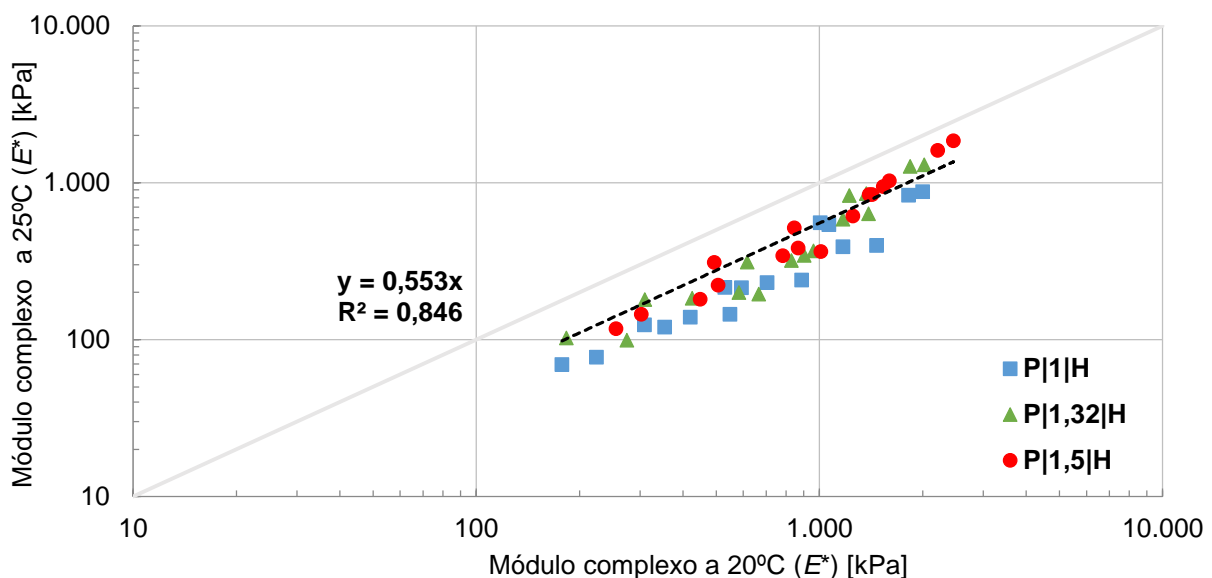


Figura 4.22 - Efeito da temperatura no valor do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).

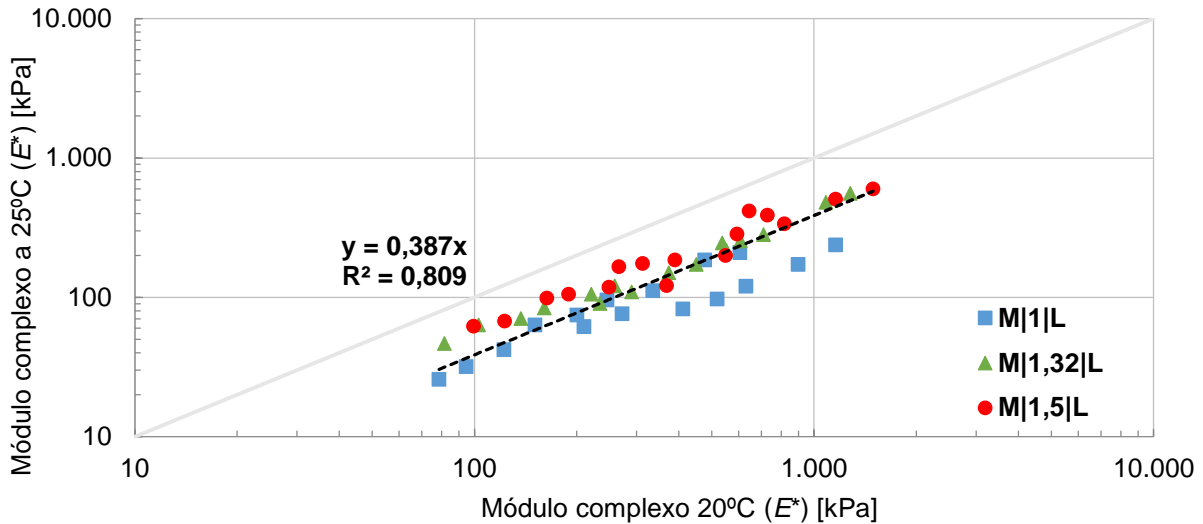


Figura 4.23 - Efeito da temperatura no valor do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).

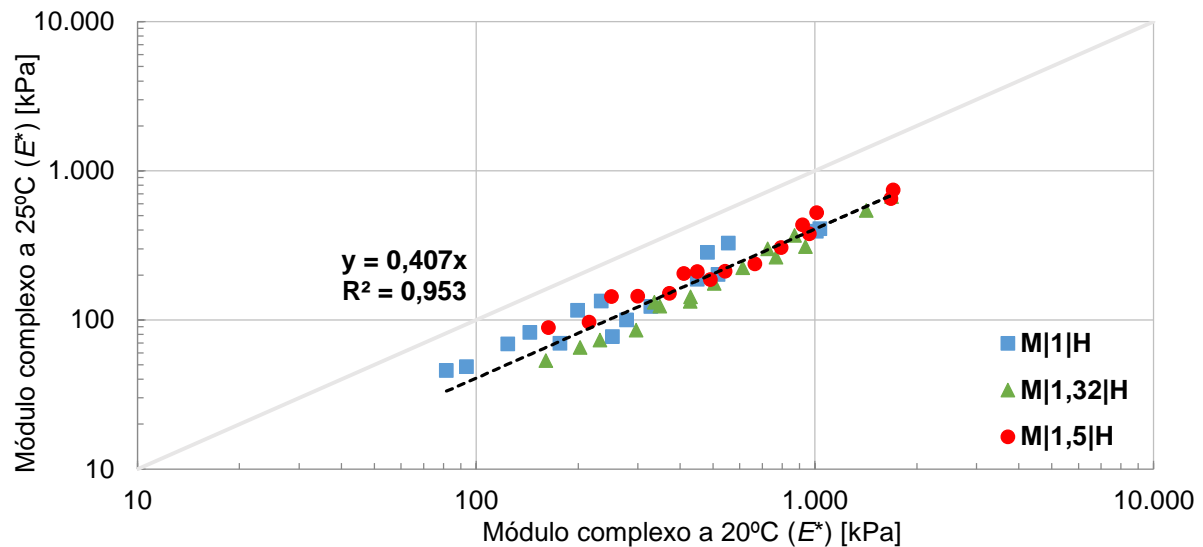


Figura 4.24 - Efeito da temperatura no valor do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H).

Ao contrário do tipo de ensaio, a temperatura tem um efeito significativo nos valores do módulo complexo. A partir das representações anteriores é possível verificar de uma forma mais óbvia que o módulo complexo diminui com o aumento da temperatura. Assim para os ensaios realizados a 20°C são obtidos valores de módulo complexo superiores. Em particular, observa-se que os mastiques fabricados com betume modificado apresentam menores valores de módulo complexo em comparação com os fabricados com betume puro. Esta observação confirma que o betume modificado possui um valor mais elevado de penetração a 25°C, comparativamente ao betume puro.

De facto, o efeito da temperatura nos mastiques com betume modificado não é tão acentuado, quando fazemos variar o tipo de fíler de cal hidráulica para calcário. Já para mastiques com betume puro,

a utilização do pó de calcário leva a maior discrepância de valores quando é aumentada a dosagem de fíler, sendo este fíler mais sensível à variação da temperatura.

Relativamente à evolução do módulo complexo com o aumento da quantidade de fíler nos mastiques, tanto no betume puro como no betume modificado, verifica-se um aumento regular do mesmo. De salientar, mais uma vez, que a regressão linear tem um ótimo ajuste às amostras de valores utilizados, destacando o mástico que é composto por betume modificado e cal hidráulica.

A análise do efeito da temperatura nos mastiques betuminosos será complementada com o subcapítulo 4.4.7, onde são apresentadas as de curvas mestras com uma temperatura de referência de 25°C.

4.4.4. Influência da razão fíler/betume

A Figuras 4.25 e Figura 4.26 ilustram a evolução do valor de módulo complexo com a variação da razão fíler/betume para o betume puro e para o betume modificado, respetivamente. Estes valores são resultado de ensaios realizados a um temperatura de 25°C e com uma frequência de 0,1 Hz.

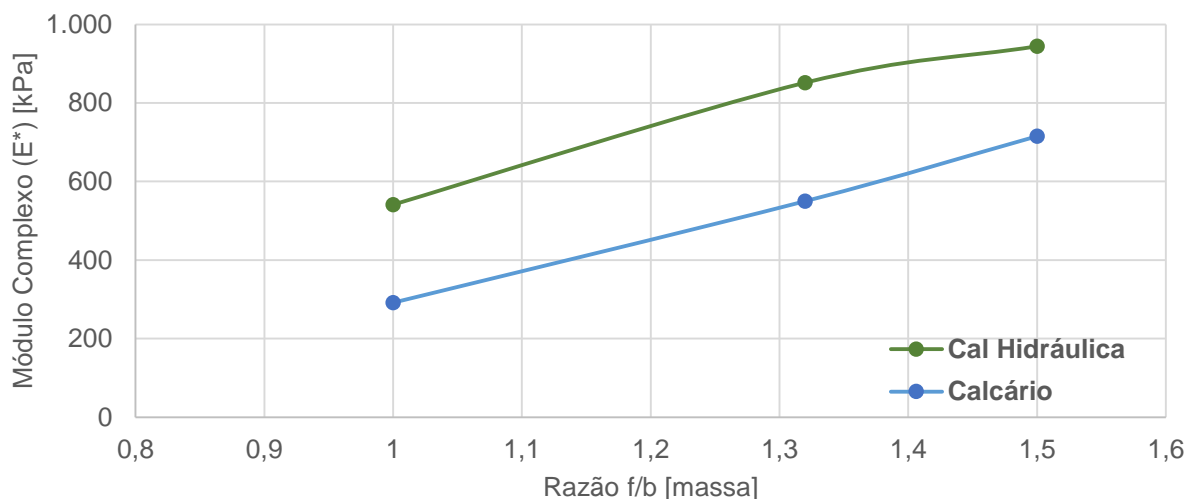


Figura 4.25 – Evolução do valor do módulo complexo para mastiques betuminosos com betume puro (P), à frequência de 0,1 Hz e a 25°C.

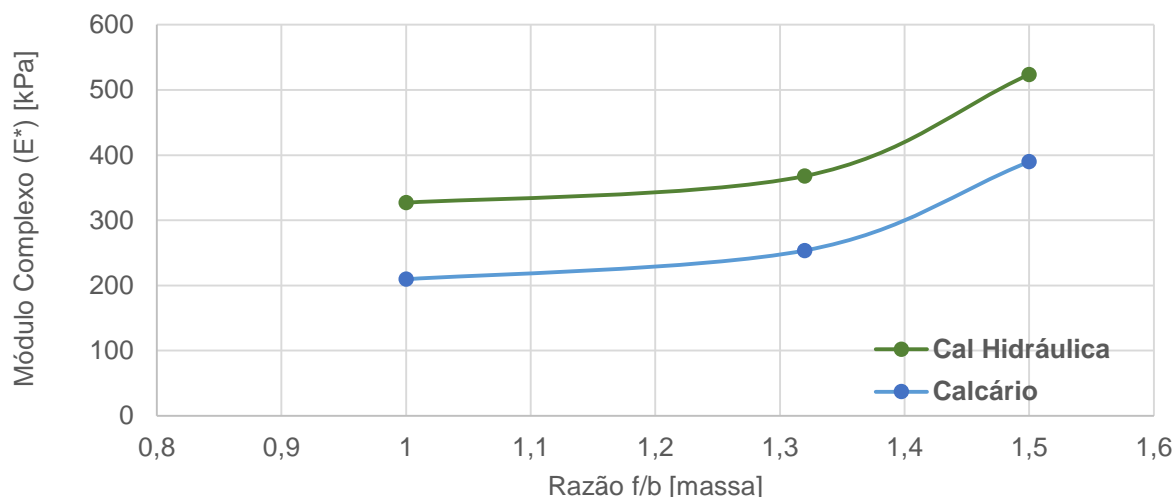


Figura 4.26– Evolução do valor do módulo complexo para mastiques betuminosos com betume modificado (M), à frequência de 0,1 Hz e a 25°C.

Como seria de esperar, na Figura 4.25 e Figura 4.26 constata-se que à medida que se aumenta a concentração de fíler no mastique, a sua rigidez aumenta. Relativamente ao tipo de betume utilizado na formulação dos provetes, é visível que para o betume puro os valores de módulo complexo são bastante superiores, quase que duplicam, em relação aos valores dos mastiques com betume modificado. Este facto justifica-se, como já referido anteriormente, devido a uma boa interação com as partículas dos fíleres, mas também devido ao betume modificado que possui uma menor rigidez e um valor mais elevado de penetração a 25°C.

Também é possível analisar que o fíler de cal hidráulica contribuí, numa grande parte, para o aumento da rigidez dos mastiques. Uma vez que se trata de um fíler comercial, o processo de fabrico é controlado, possuindo partículas granulares e ásperas e boas características geométricas capazes de explicar o maior poder de endurecimento.

4.4.5. Isócronas

A variação das propriedades reológicas com a temperatura foi analisada a partir de isócronas do módulo complexo e do ângulo de fase, correspondente à frequência de 0,1 Hz, conforme se ilustra nas Figuras 4.27 a 4.30. Nestas figuras apresentam-se dois mastiques com tipos de fíler e betume distintos, e são exibidas as variações da razão fíler/betume para cada mastique. Os restantes, por terem um comportamento bastante similar, podem ser observados no Anexo G.

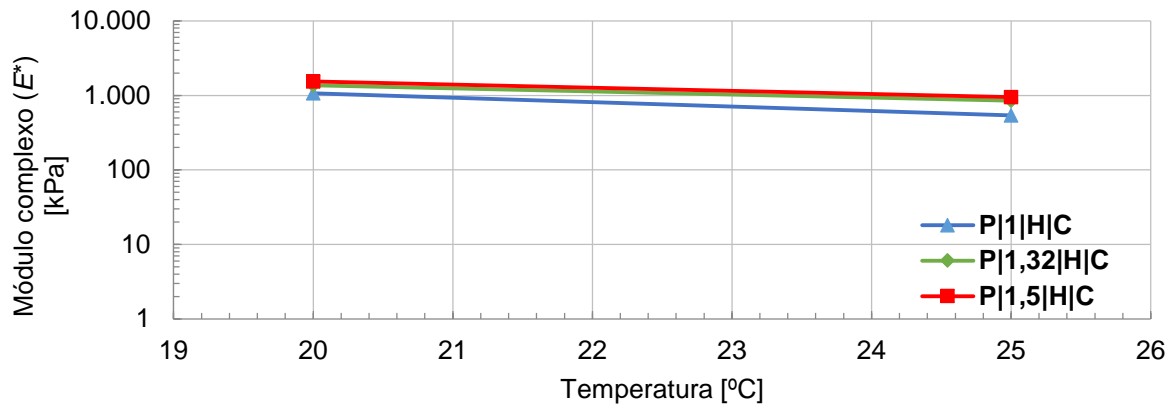


Figura 4.27 – Isócronas do módulo complexo a 0,1 Hz para os mastiques, com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).

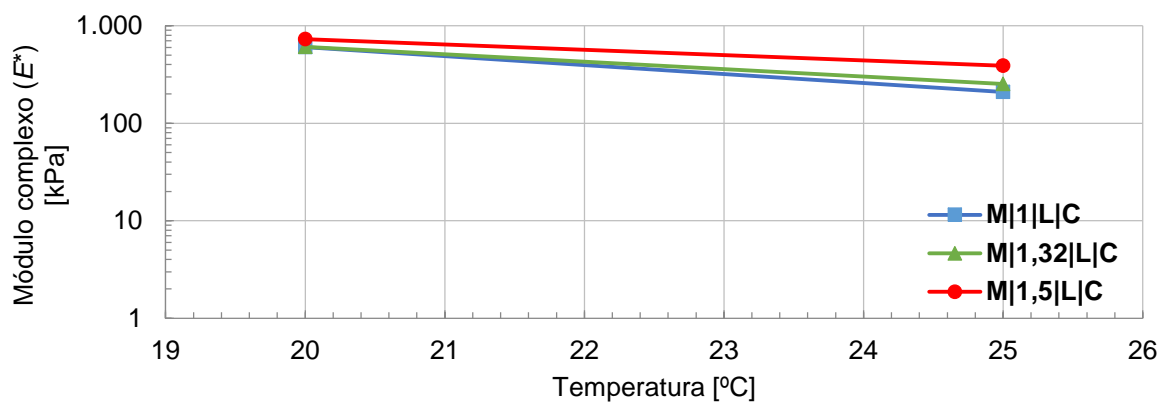


Figura 4.28– Isócronas do módulo complexo a 0,1 Hz, para os mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).

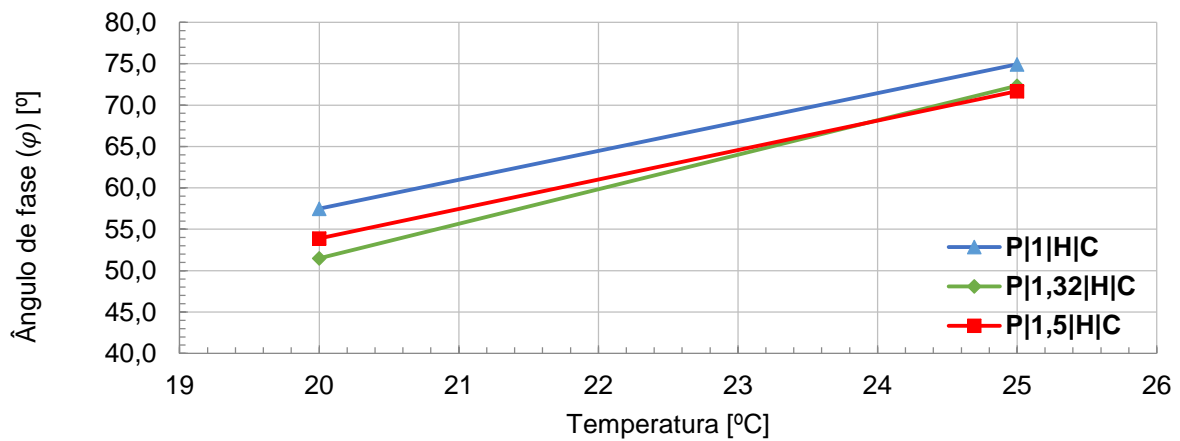


Figura 4.29 - Isócronas do ângulo de fase a 0,1 Hz, para os mastiques com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).

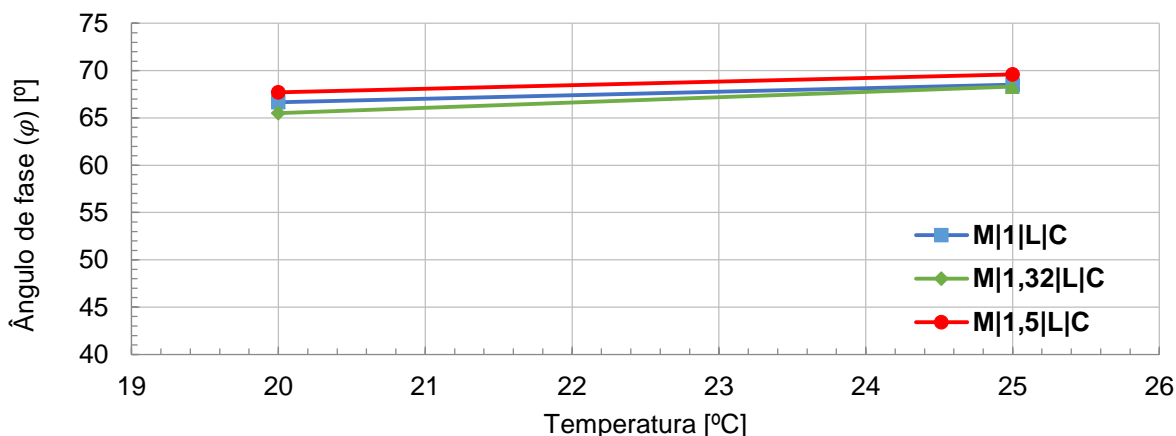


Figura 4.30 - Isócronas do ângulo de fase a 0,1 Hz, para os mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).

Em ambos os mastiques, verifica-se que o módulo complexo diminui à medida que a temperatura aumenta, ainda que essa diminuição não seja tão acentuada nos mastiques com betume puro. Pode-se constatar que os mastiques com este tipo de betume, e independentemente do fíler utilizado, possuem uma maior rigidez a 25°C que os mastiques com betume modificado.

Verifica-se também que ao nível da dosagem de fíler utilizado, é notório que quanto maior foi a dosagem de fíler maior será o valor do módulo complexo, sendo verificado quando são comparadas as razões fíler/betume de 1 e 1,5, em massa. O poder de endurecimento que o tipo de fíler confere ao mastique é significativo, tendo a cal hidráulica um maior efeito que o pó de calcário, independente do tipo de betume ao qual é misturado.

Relativamente ao ângulo de fase, à medida que a temperatura aumenta o valor deste também sofre uma evolução crescente, mas de forma destinta para o tipo de betume utilizado na formulação do mastique. Constata-se que os mastiques com betume puro são mais sensíveis às temperaturas, sofrendo um grande acréscimo, tanto para a variação do fíler com para a sua dosagem. Nos betumes modificados esse aumento é pouco expressivo, tendo uma evolução mais constante. Contudo, para estes últimos, utilizando o fíler de cal hidráulica os resultados não são conclusivos, existindo dificuldade de análise do ângulo de fase (Figura G.4).

4.4.6. Isotérmicas

A análise da variação do módulo complexo e do ângulo de fase, a uma dada temperatura, em função da frequência é apresentada a partir de curvas isotérmicas (Figuras 4.31 a 4.34). Nestas figuras são apresentados dois mastiques com tipos de fíler e betume diferentes, e exibidas as variações da razão fíler/betume para cada mastique. De revelar que aos conjuntos de resultados obtidos e expostos nas figuras, foi aplicada uma regressão linear, para uma melhor análise dos resultados. Os restantes mastiques ensaiados, por terem um comportamento bastante similar, podem ser observados no Anexo H.

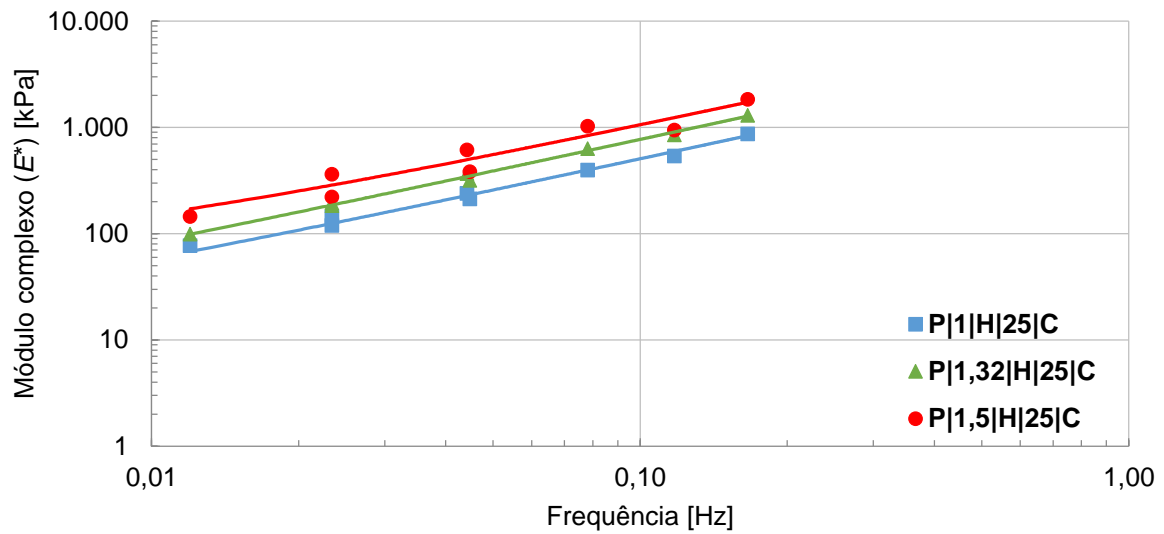


Figura 4.31 – Isotérmicas do módulo complexo para os mastiques com betume puro (P) e filer de cal hidráulica (H), a 25°C.

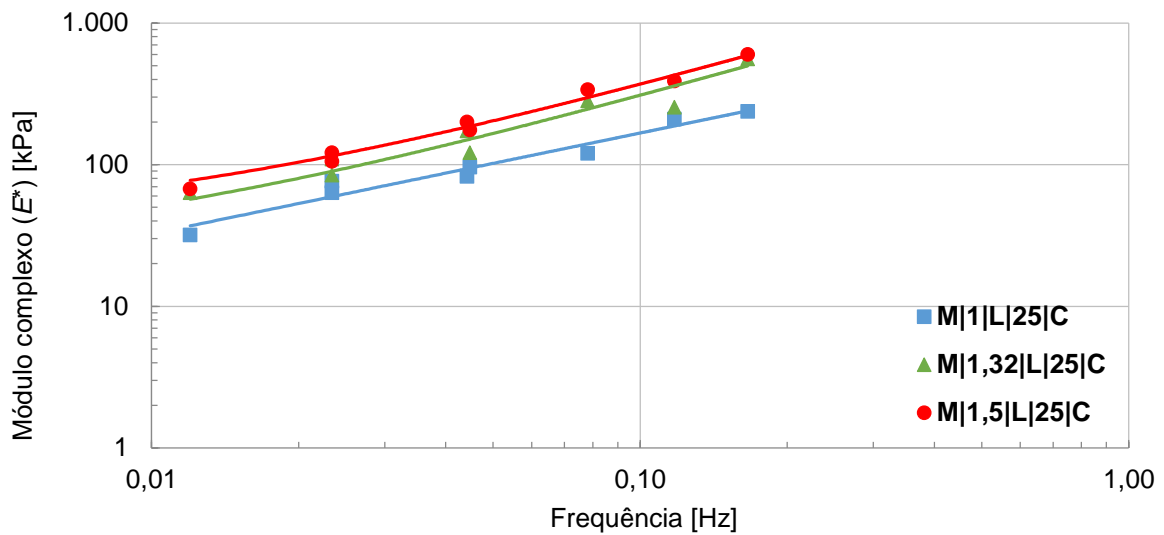


Figura 4.32 – Isotérmicas do módulo complexo para os mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L), a 25°C.

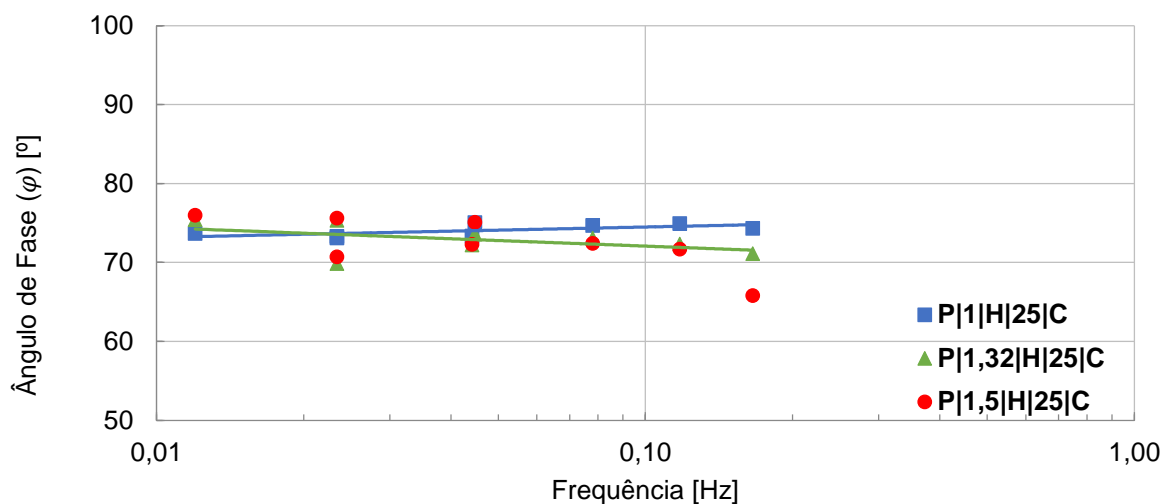


Figura 4.33 – Isotérmicas do ângulo de fase para os mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), a 25°C.

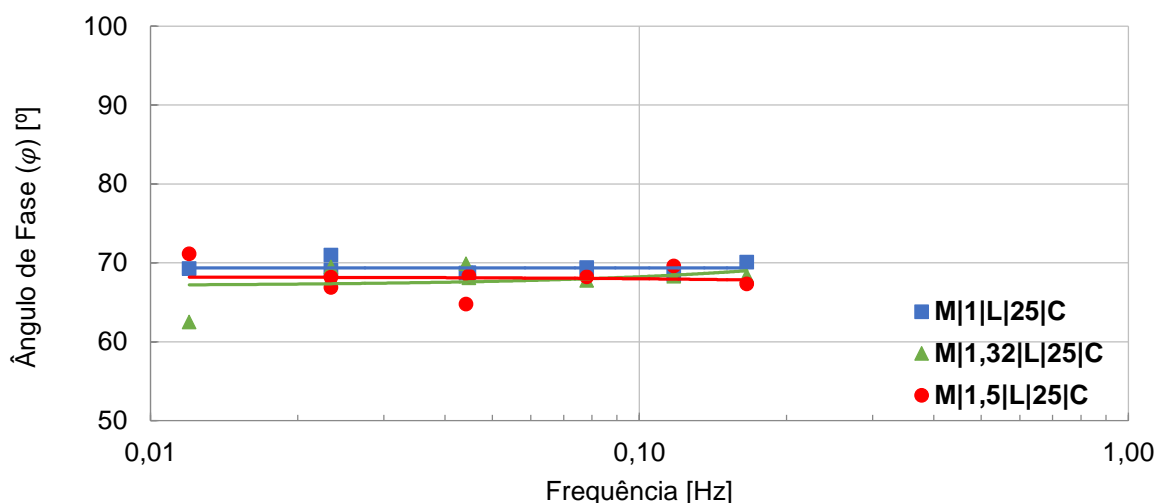


Figura 4.34 – Isotérmicas do ângulo de fase para os mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L), a 25°C.

A partir das representações anteriores é possível verificar de uma forma mais clara o aumento e a diminuição, respetivamente, do módulo complexo e do ângulo de fase, à medida que a frequência aumenta.

É também possível constatar que a evolução do módulo complexo com a frequência é semelhante em todos os mastiques, tendo a regressão linear um declive semelhante em todas as isotérmicas ainda que para o caso de mastiques com pó de calcário exista um maior afastamento entre duas isotérmicas consecutivas, principalmente quando se passa da razão fíler/betume de 1 para 1,32. Este efeito é revelador de uma maior sensibilidade do módulo complexo à variação da dosagem de fíler. No entanto verifica-se com os mastiques possuem um módulo complexo mais elevado quando na sua formulação tem betume puro e fíler de cal hidráulica.

Para o ângulo de fase, em modo geral pode-se constatar que a variação do ângulo de fase é mínima para todos os mastiques. Contudo é de salientar que existe uma grande discrepância de valores obtidos para os mastiques com razão fíler/betume de 1,5, tanto para o pó de calcário como o de cal hidráulica, e sobretudo para os mastiques com betume modificado. São obtidos valores muito variáveis e,

por essa razão, não é apresentada a regressão linear dos mesmos. De salientar que para o mastique com betume modificado e fíler de cal hidráulica (Figura H.4) essa discrepância ainda é mais verificada.

4.4.7. Curvas-mestras

Como já referenciado no subcapítulo 2.4.3, as curvas mestras fornecem um perfil reológico completo dos mastiques permitindo ter resultados para uma ampla gama de frequências, quando existem limitações nos ensaios.

Desta forma, e tendo como base o princípio da sobreposição tempo-temperatura e construíram-se curvas-mestras do módulo complexo e do ângulo de fase dos mastiques ensaiados, a uma temperatura de referência de 25°C. Foi escolhido manualmente os fatores de deslocamento, a_T , de forma a alcançar uma sobreposição adequada das curvas isotérmicas relativas ao módulo complexo e do ângulo de fase. Posteriormente, recorreu-se ao método dos mínimos quadrados de forma a determinar as constantes da equação de William, Landel e Ferry, tendo-se obtido um valor de 10,49 para a constante C_1 e um valor de 89,34 para a constante C_2 . Em comparação com os valores das curvas-mestras obtidas para betumes utilizados nos mastiques (11,42 e 97,36 respetivamente), nota-se que os valores de ajustamento baixaram (Pereira, 2014).

Os valores das contantes C_1 e C_2 foram adotadas para todos os mastiques ensaiados e para a construção das curvas-mestras tanto do módulo complexo como para o ângulo de fase. Verificou-se uma sobreposição admissível de valores para o módulo complexo e uma simplificação aceitável para o ângulo de fase. Assim sendo pretende-se mostrar a variação dos fatores de deslocamento com a temperatura, incluindo os fatores determinados manualmente e o ajustamento com a equação de William, Landel e Ferry (Figura 4.35).

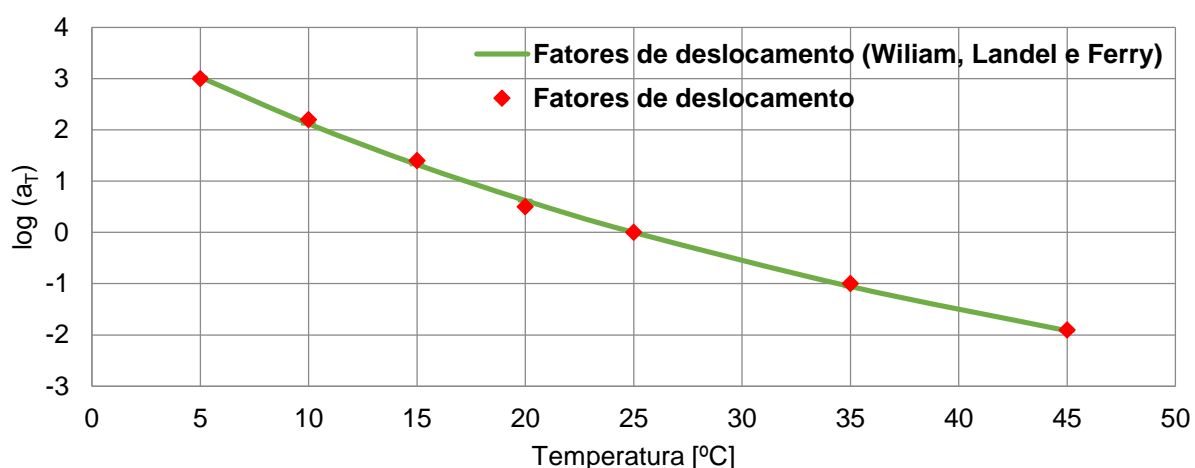


Figura 4.35 – Variação dos fatores de deslocamento com a temperatura, tendo como temperatura de referência de 25°C.

Através da observação da figura é possível concluir que os fatores de deslocamento determinados manualmente ajustam-se, quase na perfeição, aos valores da equação de William, Landel e Ferry. Assim foi possível apresentar as curvas-mestras para todos os mastiques ensaiados.

Nas Figuras 4.36 a 4.39 são apresentadas, como exemplo, as curvas-mestras para o módulo complexo e ângulo de fase para dois mastiques com formulações distintas. No Anexo I são apresentadas as restantes curvas-mestras para todas as formulações de mastiques ensaiados.

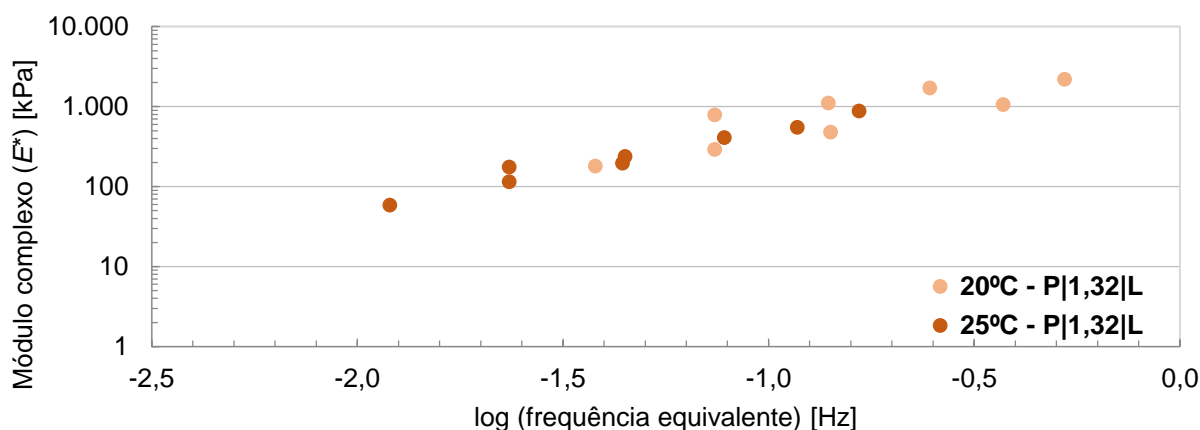


Figura 4.36 – Curvas-mestra do módulo complexo do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,32.

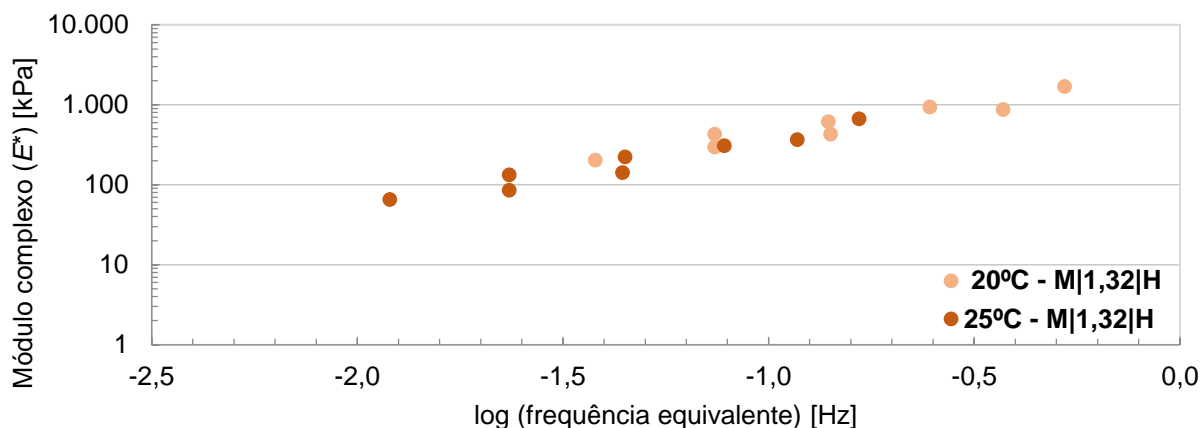


Figura 4.37 – Curvas-mestra do módulo complexo do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), filer de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,32.

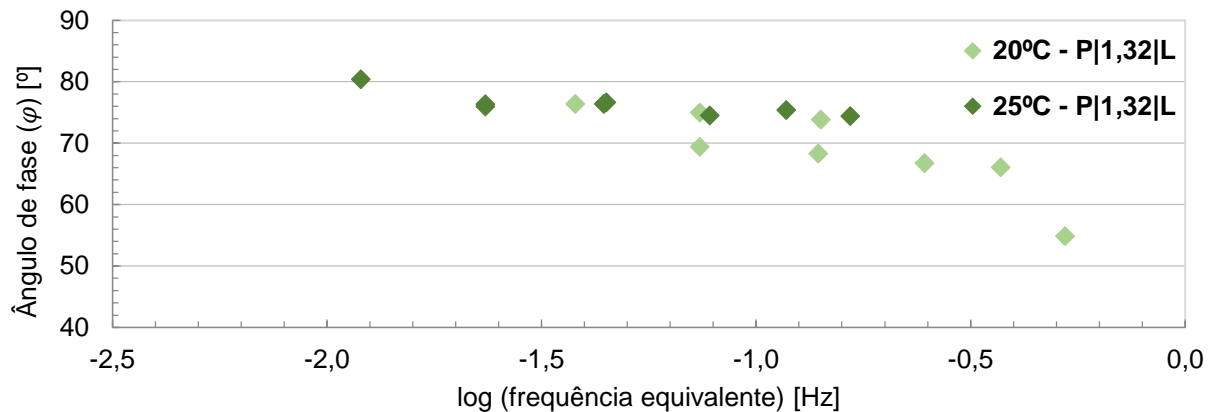


Figura 4.38 – Curvas-mestra do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,32.

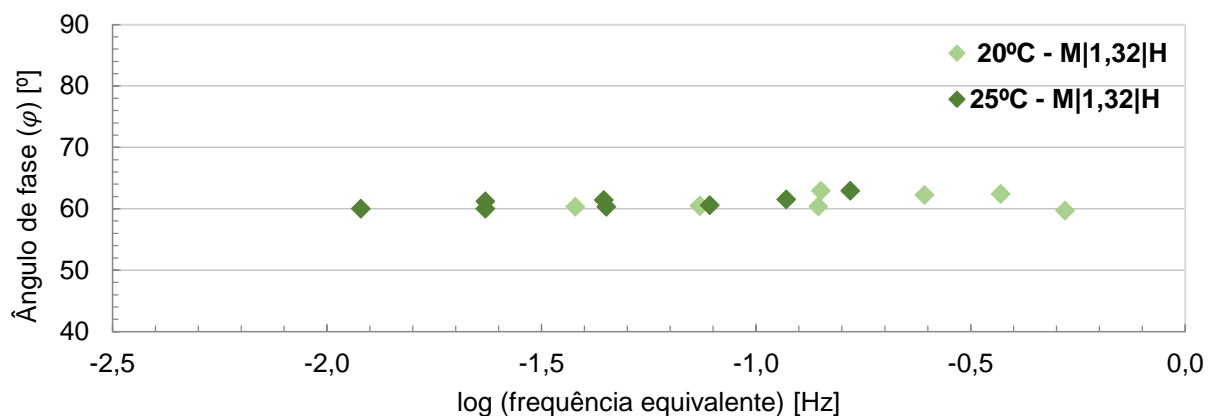


Figura 4.39 – Curvas-mestra do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), filer de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,32.

A partir das Figuras 4.36 a 4.39 é possível verificar que os fatores de deslocamento utilizados permitem uma boa continuidade dos resultados dos ensaios. Assim as duas curvas isotérmicas de cada mastique são alinhadas e sobrepostas resultando em uma curva única à temperatura de referência de 25°C. É notório que existe uma diferença entre o comportamento dos resultados nas curvas-mestras do módulo complexo e as curvas-mestras do ângulo de fase.

Para uma melhor análise desse comportamento são apresentadas as curvas-mestras para todos os mastiques, agrupando os que utilizaram o mesmo tipo de betume e filer, exibindo a variação de dosagem de filer (Figuras 4.40 a 4.47). Nas mesmas curvas-mestras também são apresentados os resultados dos betumes utilizados, sem qualquer adição de filer, ensaiados no reômetro de corte dinâmico (Pereira, 2014).

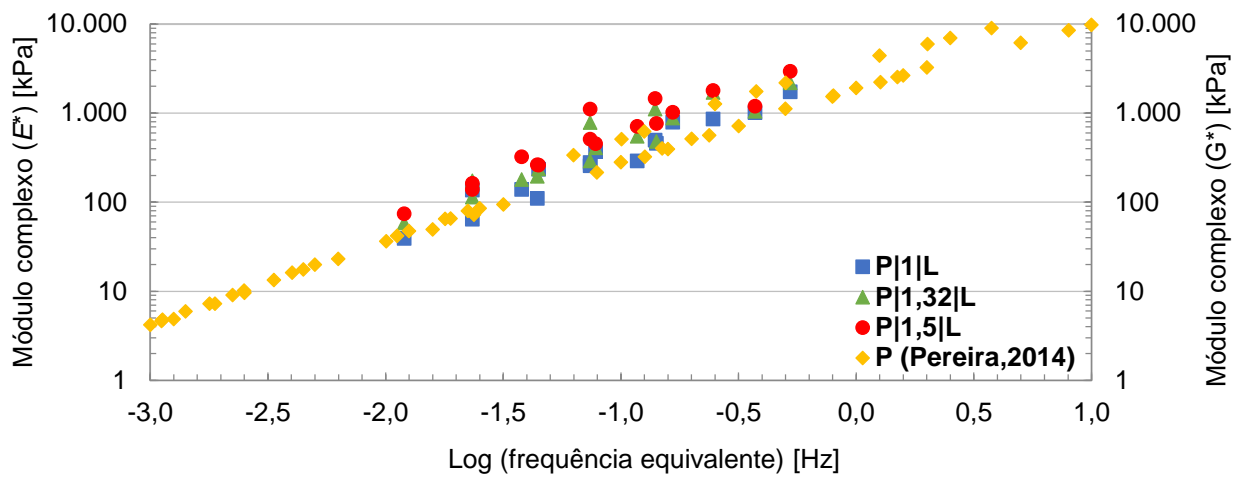


Figura 4.40 – Curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L) para uma temperatura de referência de 25°C.

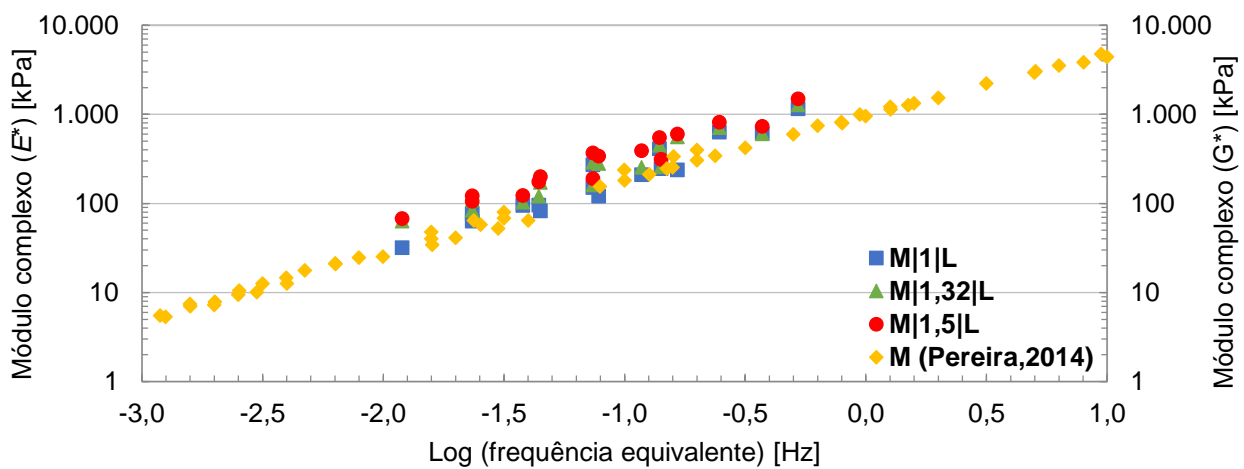


Figura 4.41 – Curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L) para uma temperatura de referência de 25°C.

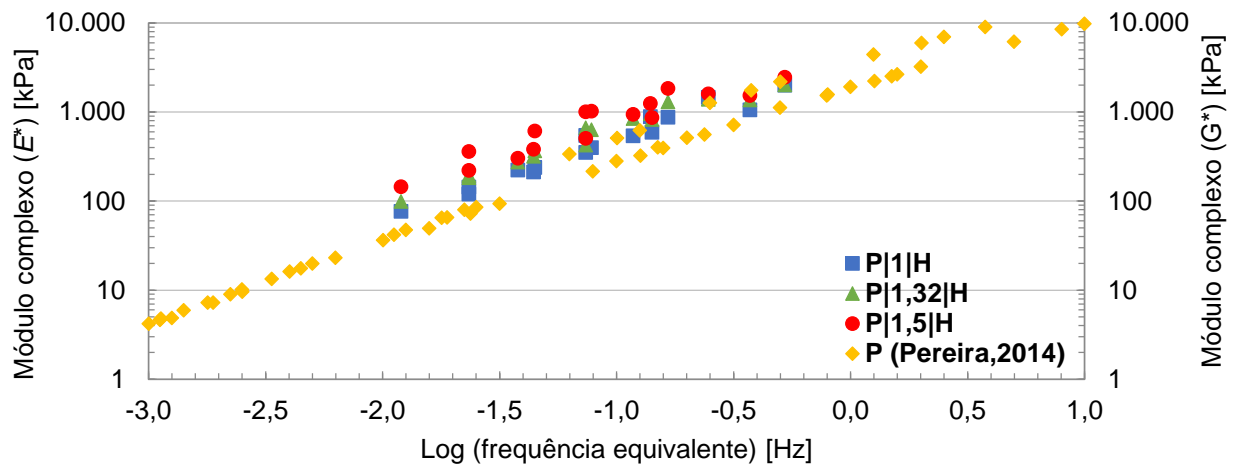


Figura 4.42 – Curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques com betume puro (P) fíler de cal hidráulica (H) para uma temperatura de referência de 25°C.

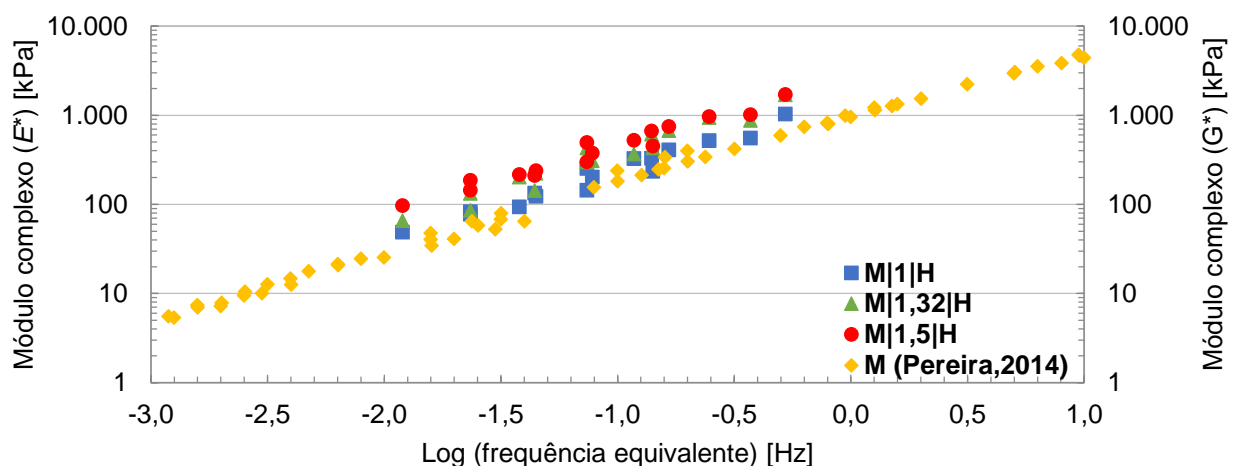


Figura 4.43 – Curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques com betume modificado (M) fíler de cal hidráulica (H) para uma temperatura de referência de 25°C.

As Figuras 4.40 a 4.43, que apresentam as curvas-mestras do módulo complexo dos mastiques, mostram que independente dos materiais utilizados no seu fabrico, estas apresentam um comportamento bastante semelhante ao dos betumes ensaios no reómetro de corte dinâmico. Contudo, à medida que a dosagem de fíler aumenta, a curva-mestre tem tendência a afastar-se devido ao aumento do módulo complexo. Assim reforça-se a ideia que os mastiques com o betume puro apresentam valores de rigidez superiores aos mastiques com o betume modificado. Tal comportamento é também verificado quando o fíler de cal hidráulica é comparado com o pó de calcário. Evidencia-se que as curvas-mestras dos mastiques com o agregado de cal hidráulica expõem um comportamento mais linear, tendo uma evolução mais constante, ostentando um certo paralelismo entre curvas-mestras.

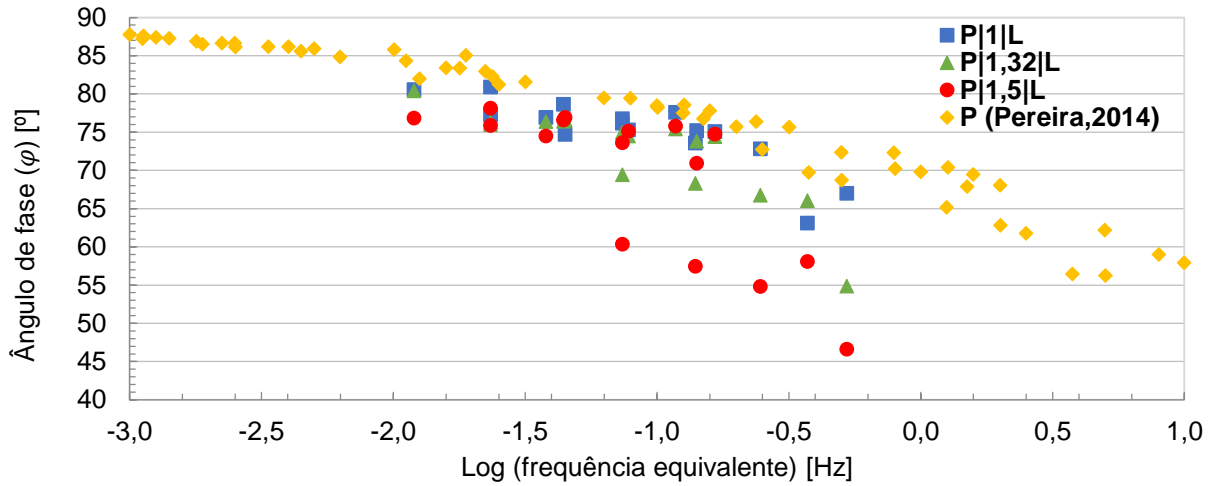


Figura 4.44 – Curvas-mestras do ângulo de fase dos mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L) para uma temperatura de referência de 25°C.

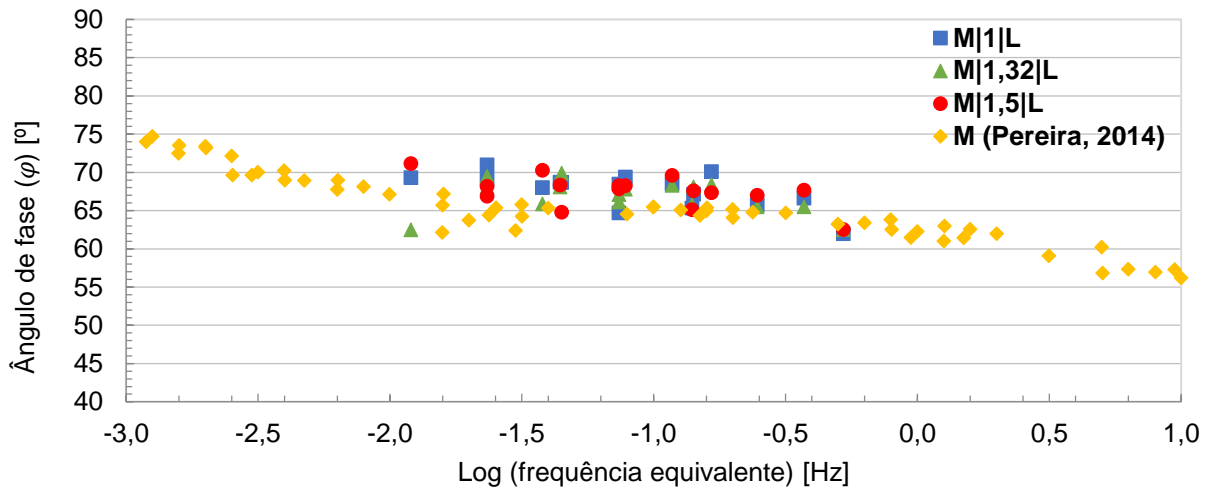


Figura 4.45 – Curvas-mestras do ângulo de fase dos mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L) para uma temperatura de referência de 25°C.

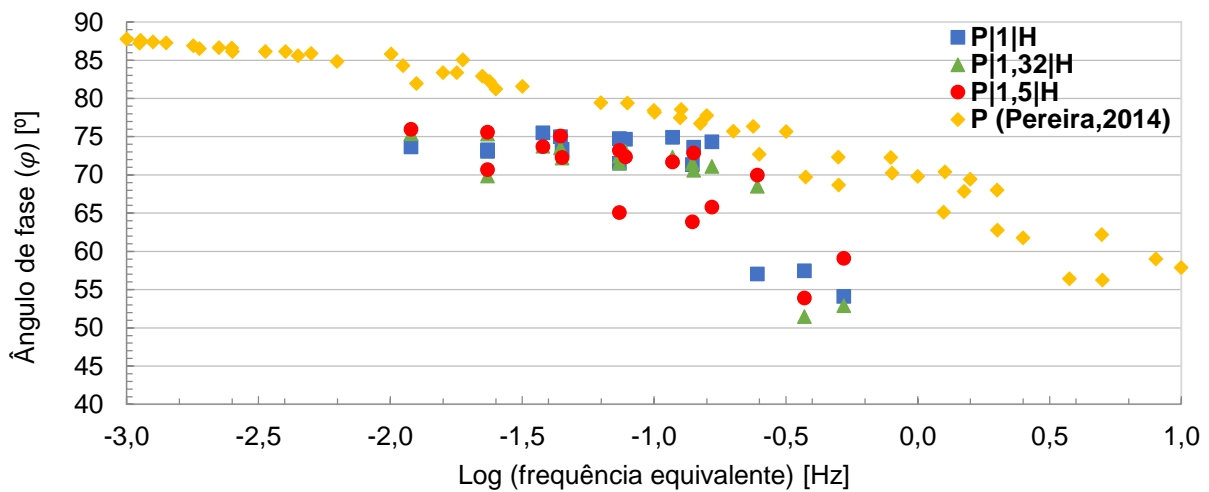


Figura 4.46 – Curvas-mestras do ângulo de fase dos mastiques com betume puro (P) fíler de cal hidráulica (H) para uma temperatura de referência de 25°C.

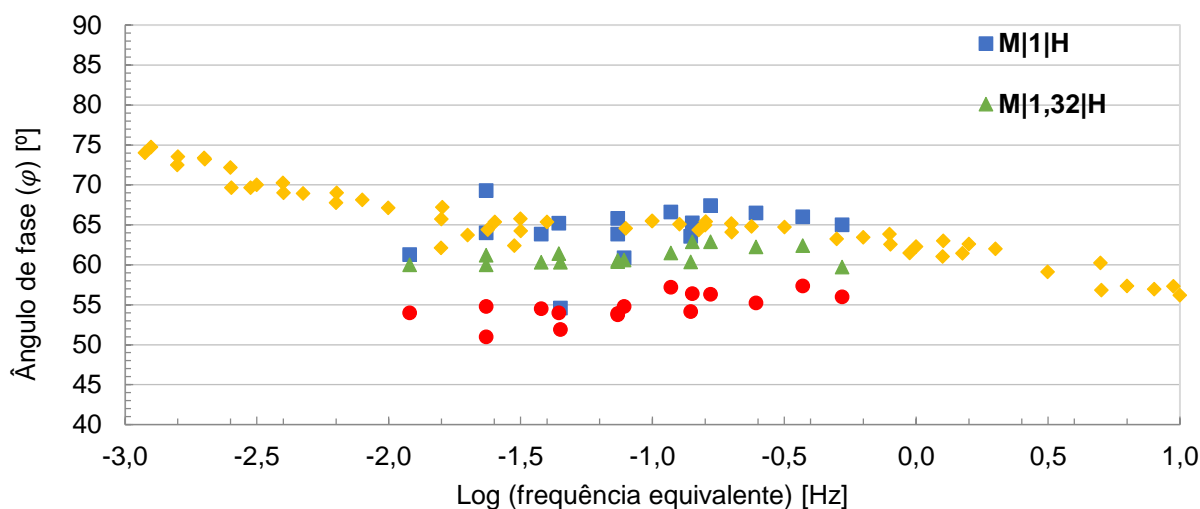


Figura 4.47 – Curvas-mestras do ângulo de fase dos mastiques com betume modificado (M) fíler de cal hidráulica (H) para uma temperatura de referência de 25°C.

Por observação das Figuras 4.44 a 4.47, torna-se evidente que os valores do ângulo de fase dos mastiques com betume modificado são, geralmente, bastante inferiores aos mastiques com betume puro.

Para os mastiques com betume puro denota-se que o ângulo de fase, em comparação com os resultados de Pereira (2014), é sempre inferior. Também é possível verificar que à medida que a frequência aumenta os resultados do ângulo de fase apresentam um comportamento irregular. Este comportamento é verificado para os dois tipos de fíler.

Apesar das curvas-mestras mostrarem um certo paralelismo quando ao mastique é adicionado o fíler de cal hidráulica, os resultados apresentam uma variação significativa, estando dependentes da dosagem de fíler adicionado. Ressalva-se que se verificou uma sobreposição menos aceitável no caso das isotérmicas do ângulo de fase dos mastiques com a maior razão fíler/betume (1,5).

Relativamente aos mastiques com betume modificado, estes apresentam uma evolução constante de valores quando misturados com pó de calcário. Esta situação só se verifica na mesma razão fíler/betume, quando o mastique de betume modificado contém fíler de cal hidráulica.

É importante referir que Olard e Di Benedetto (2003) defendem que aos betumes modificados apenas pode ser aplicável o princípio da sobreposição tempo-temperatura de forma parcial, sendo apenas empregue para a construção das curvas-mestras do módulo complexo. A forma geral das curvas-mestras obtidas, tanto para o módulo complexo como para o ângulo de fase, é semelhante à encontrada na bibliografia estudada.

4.4.8. Diagrama de Black

Nas Figuras 4.48 a 4.51 é possível observar os diagramas de Black dos mastiques com diferentes tipos de betume e fíler. São também exibidas as variações da razão fíler/betume para cada mastique.

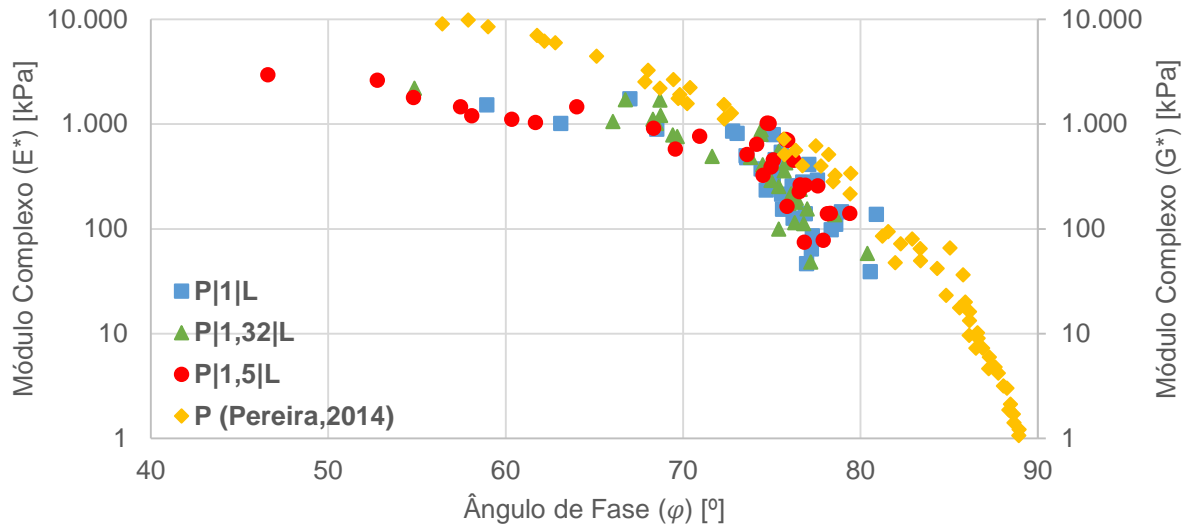


Figura 4.48 - Diagramas de Black dos mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L).

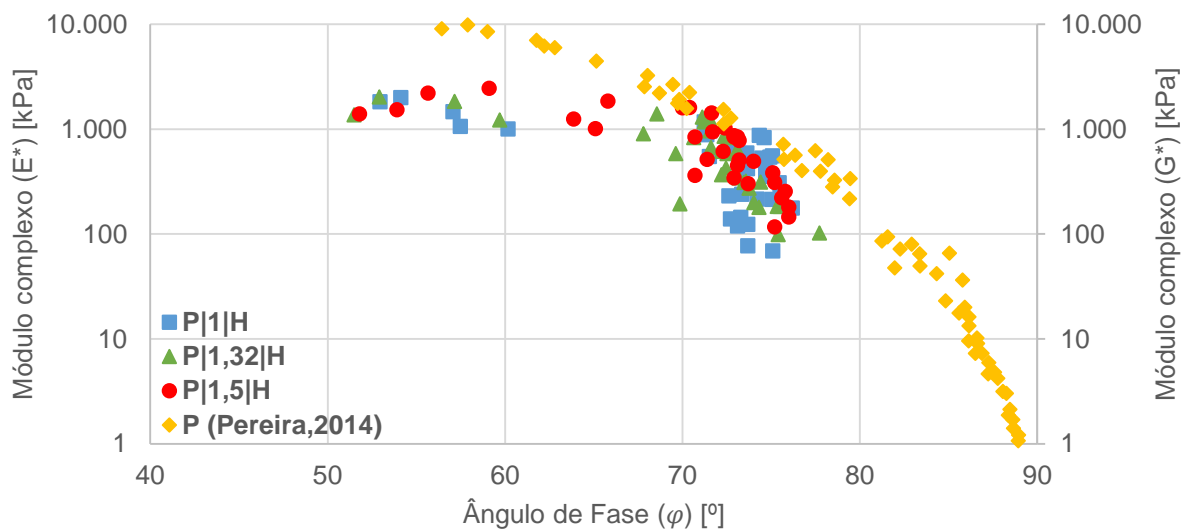


Figura 4.49 - Diagramas de Black dos mastiques com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H).

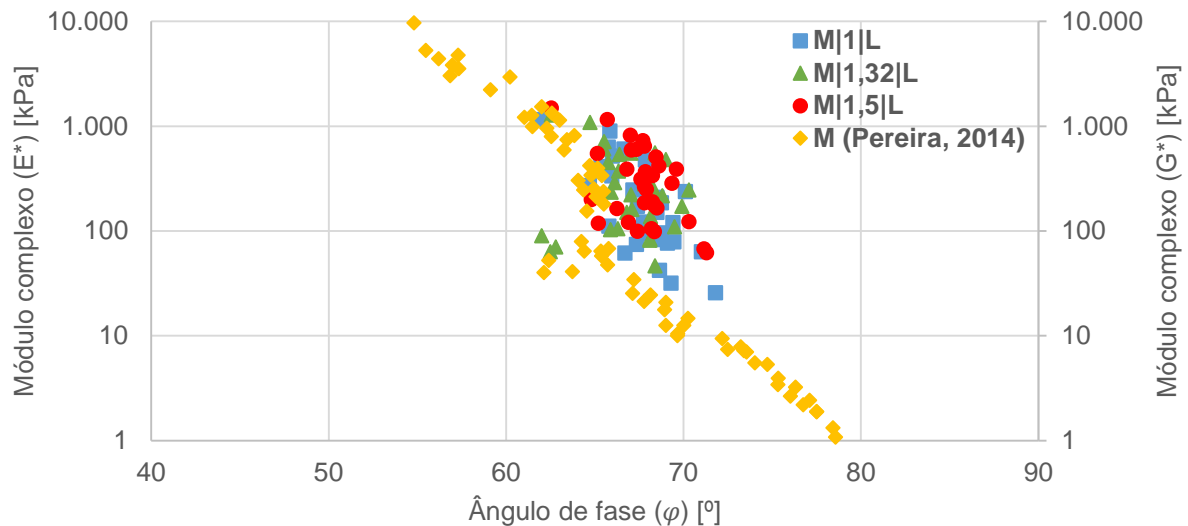


Figura 4.50 - Diagramas de Black dos mastiques com betume modificado (M) e pó de calcário (L).

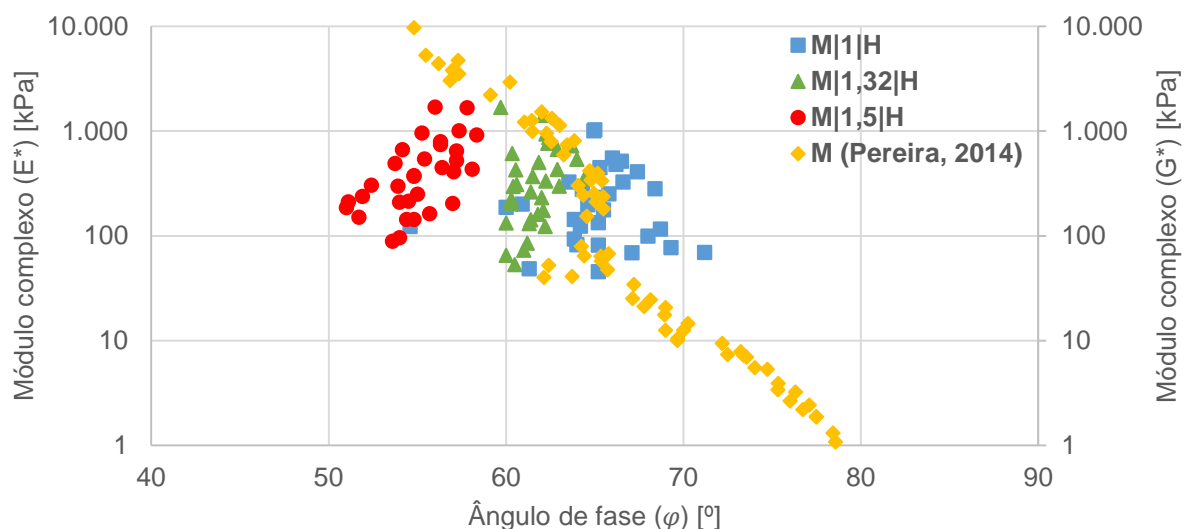


Figura 4.51 - Diagramas de Black dos mastiques com betume puro (M) e fíler de cal hidráulica (H).

A partir das figuras anteriores verifica-se que os mastiques com betume modificado apresentam menores ângulos de fase, raramente ultrapassando o valor de 70°. Desta forma poder-se-á afirmar que estes mastiques possuem sempre uma maior elasticidade, podendo estar relacionada com a adição de elastómeros. Também é possível observar uma aglomeração de resultados para este tipo de betume, mesmo quando é a dosagem de fíler varia. Este comportamento reforça a ideia de Airey (1997) que para betumes com a presença de polímeros, existe uma falha do princípio da sobreposição tempo-temperatura. De referir que para o fíler de cal hidráulica os resultados apresentam uma irregularidade notória, principalmente com o aumento da razão fíler/betume.

Por outro lado, para os mastiques com betume puro consegue-se perceber a tendência dos resultados obtidos, apresentando uma dada evolução de valores. Esse aspeto é reforçado quando é adicionado o fíler de cal hidráulica. De salientar que quando é utilizada a maior dosagem de fíler, alguns

resultados obtidos para o ângulo de fase apresentam valores pouco coerentes, podendo estar ligados a algum erro experimental ou a uma diferente interação fíler-betume.

Em comparação com os valores obtidos por Pereira (2014), constata-se que a maior parte de resultados se agrupa de forma semelhante, e as principais variações devem-se não só às diferentes gamas de temperatura e frequência utilizadas, como o tipo de ensaio realizado.

4.5. Modelação dos resultados experimentais com o modelo 2S2P1D

Com base no modelo 2S2P1D, apresentado no subcapítulo 2.3, foram calculados os valores do módulo complexo e do ângulo, considerando uma temperatura de referência de 25°C. Os valores das constantes do modelo foram inicialmente arbitrados com base em alguns valores encontrados na bibliografia consultada.

Assim ajustaram-se os valores das restantes constantes com base num método de tentativa e erro de forma a conferir-se um ajustamento satisfatório aos resultados experimentais. De ressaltar que uma vez que não se efetuou o diagrama de Cole-Cole, devido a necessidade de realizar ensaios a temperaturas mais baixas, por ventura até temperaturas negativas, o que seria impossível tendo em conta as limitações do equipamento utilizado, os valores das constantes não tiveram em conta o mesmo. Nas tentativas realizadas existiu maior dificuldade de obter um bom ajustamento para os valores do ângulo de fase.

Encontram-se apresentados no Quadro 4.1 e Quadro 4.2 os valores utilizados para as várias constantes do modelo 2S2P1D, para todos os mastiques betuminosos.

Tabela 4.1 – Constantes do modelo 2S2P1D correspondentes aos mastiques betuminosos com betume puro (P) e os dois tipos de fíler.

	E_0 [kPa]	E_∞ [GPa]	k	h	α	λ	β
P 1 L	0,01	2	0,21	0,61	3,5	$5,5 \times 10^{-6}$	100
P 1,32 L	0,05	2	0,21	0,61	3,5	$5,0 \times 10^{-6}$	100
P 1,5 L	0,1	4,5	0,21	0,61	3,5	$4,5 \times 10^{-6}$	100
P 1 H	0,01	2	0,21	0,61	3,5	$6,0 \times 10^{-6}$	150
P 1,32 H	0,05	2,5	0,21	0,61	3,5	$5,5 \times 10^{-6}$	150
P 1,5 H	0,1	5	0,21	0,61	3,5	$5,0 \times 10^{-6}$	150

Tabela 4.2 - Constantes do modelo 2S2P1D correspondentes aos mastiques betuminosos com betume modificado (M) e os dois tipos de fíler.

	E_0 [kPa]	E_∞ [GPa]	k	h	α	λ	β
M 1 L	0,04	6	0,21	0,68	5,5	$1,0 \times 10^{-6}$	300
M 1,32 L	0,1	7	0,21	0,68	5,5	$1,2 \times 10^{-6}$	300
M 1,5 L	0,2	8	0,21	0,68	5,5	$1,3 \times 10^{-6}$	300
M 1 H	0,04	6	0,21	0,68	5,5	$1,1 \times 10^{-6}$	500
M 1,32 H	0,1	7	0,21	0,68	5,5	$1,5 \times 10^{-6}$	500
M 1,5 H	0,2	8	0,21	0,68	5,5	$1,8 \times 10^{-6}$	500

Nas Figuras 4.52 a 4.55 é apresentado o ajustamento do modelo 2S2P1D aos resultados experimentais para o módulo complexo de quatro mastiques com formulações distintas, a uma temperatura de referência de 25°C. No Anexo J são exibidos os restantes ajustamentos para todas as formulações de mastiques ensaiados.

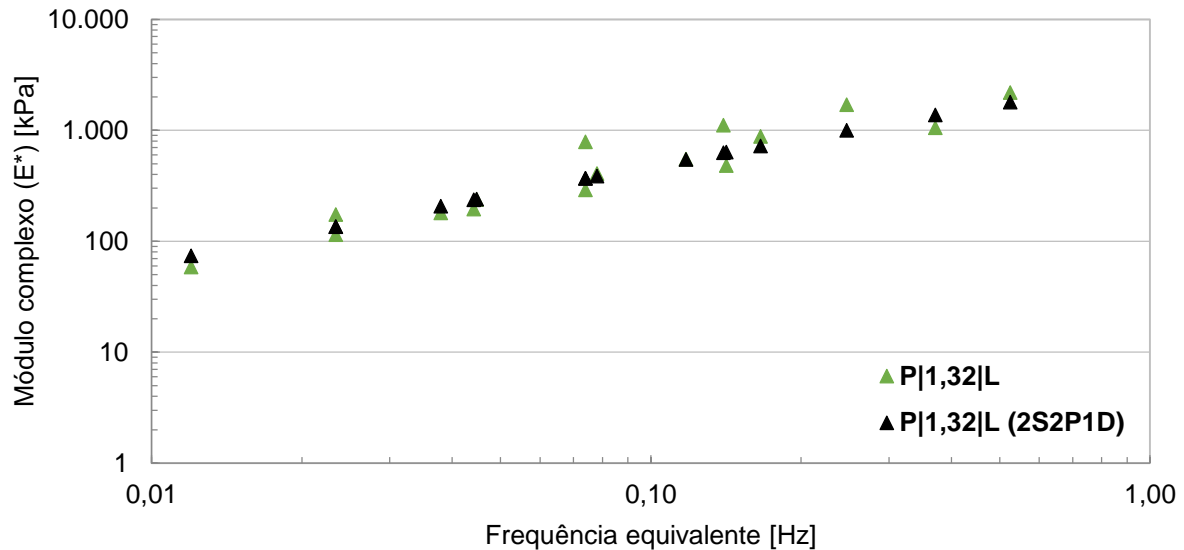


Figura 4.52 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume puro (P) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

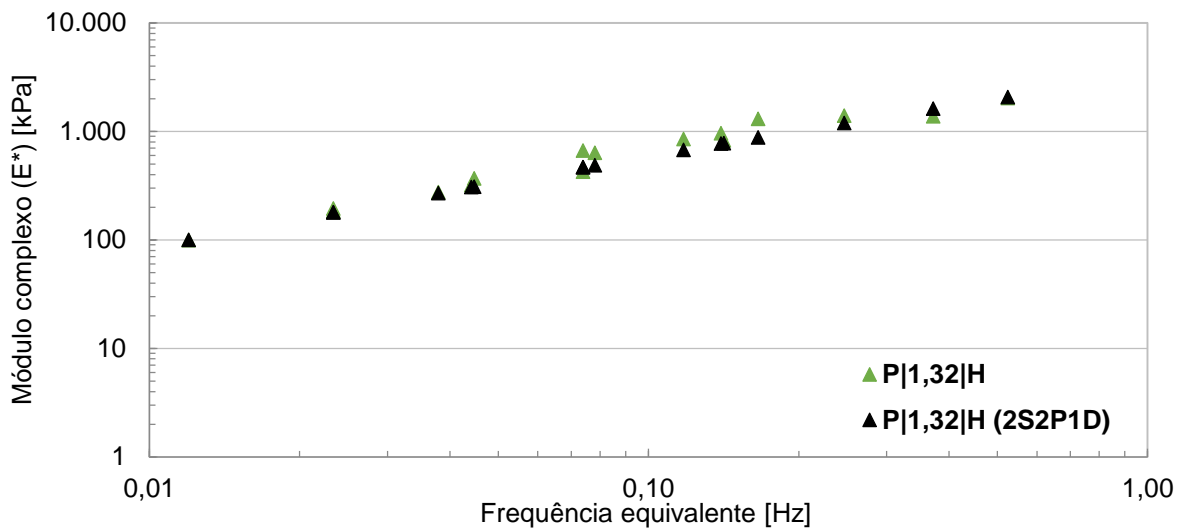


Figura 4.53 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

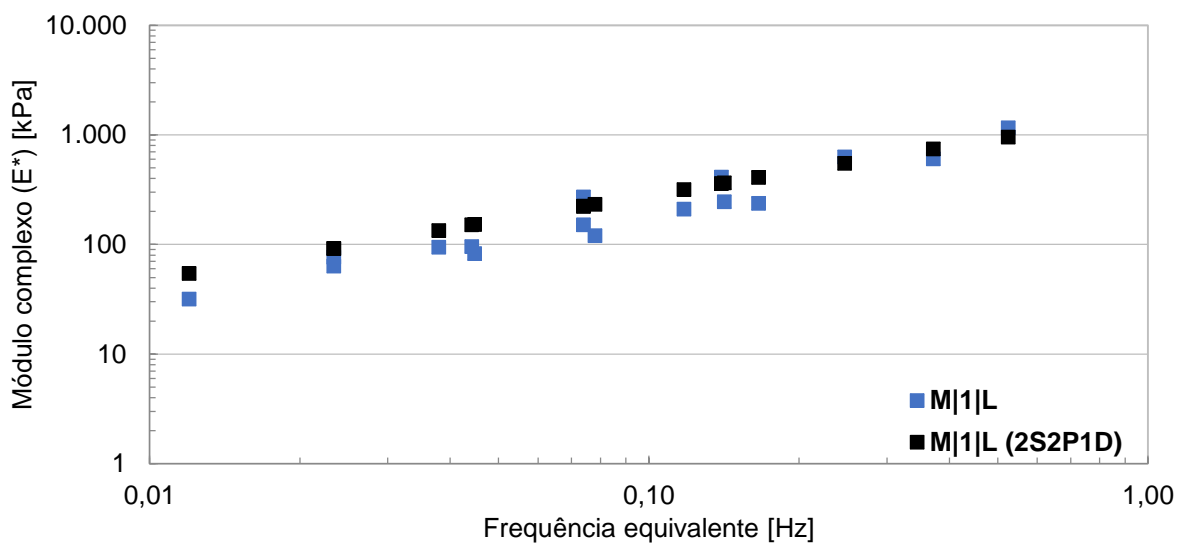


Figura 4.54 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.

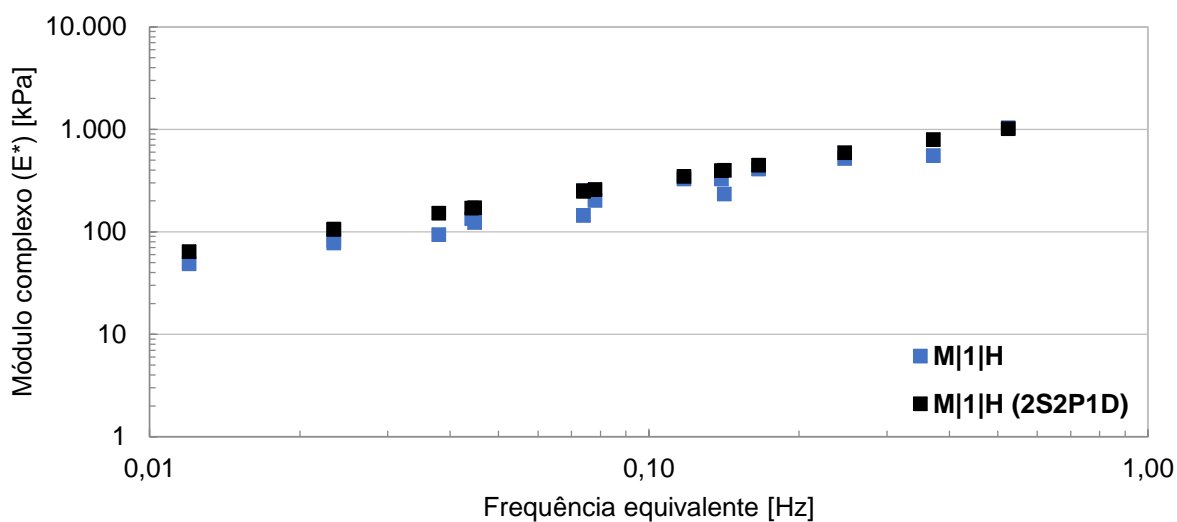


Figura 4.55 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.

Observa-se que os valores obtidos para as constantes do modelo 2S2P1D ajustam-se de forma bastante admissível aos resultados experimentais, independentemente do betume, fíler ou razão fíler/betume. Nas Figuras 4.56 a 4.59 é apresentado o ajustamento do modelo 2S2P1D aos resultados experimentais para o ângulo de fase de quatro mastiques com formulações distintas já apresentados anteriormente, a uma temperatura de referência de 25°C. No Anexo J são exibidos os restantes ajustamentos para todas as formulações de mastiques ensaiados.

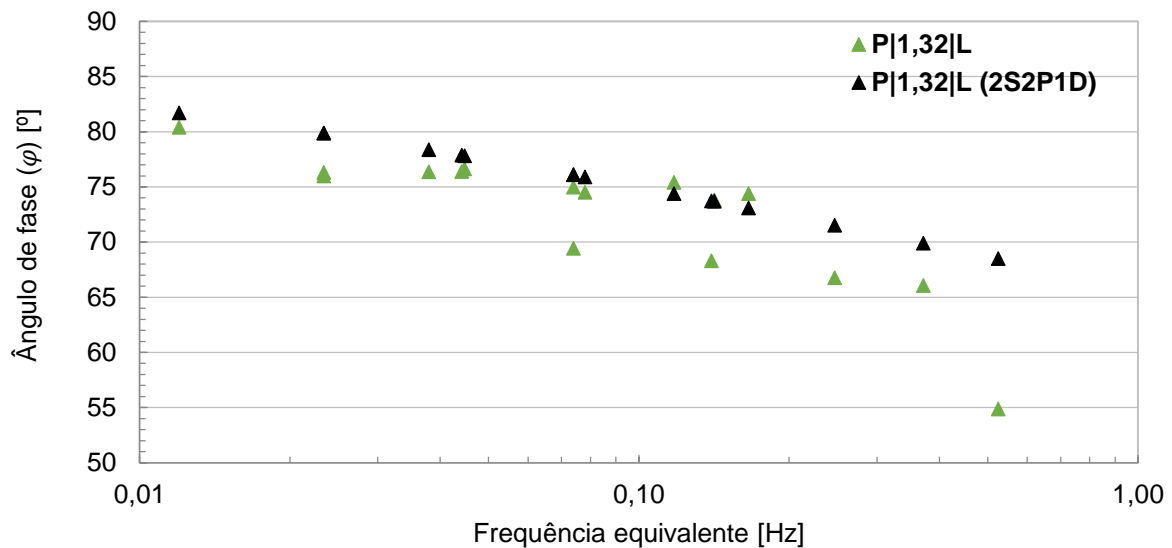


Figura 4.56 - Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mástico com betume puro (P) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

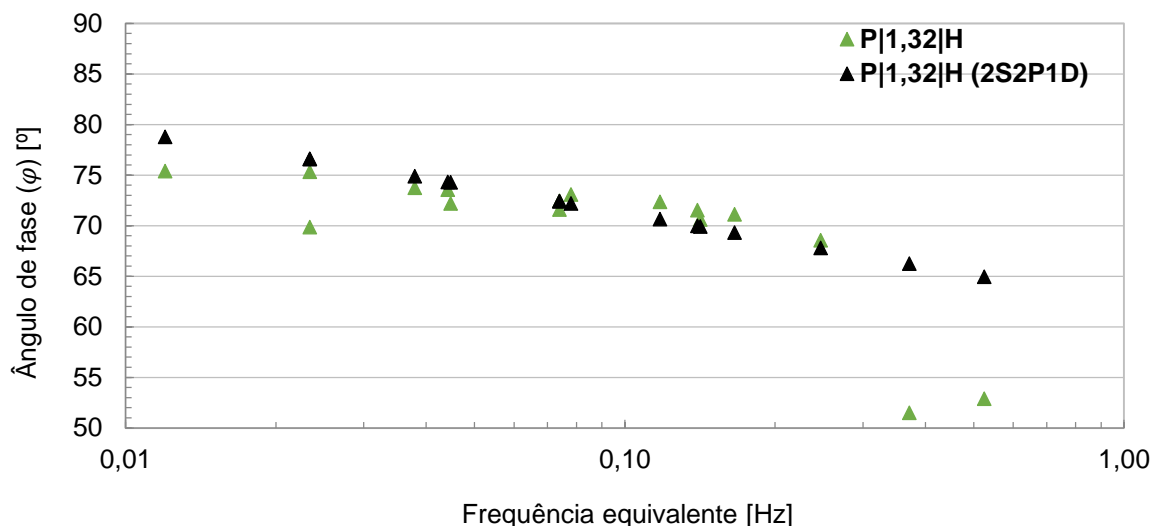


Figura 4.57 - Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mástico com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (M) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

De uma forma geral, o ajustamento ao nível do ângulo de fase é razoável para a menor dosagem de fíler e para os mastiques onde foi utilizado o betume puro. Contudo, à medida que a dosagem de fíler aumenta, o ajustamento perde qualidade, obtendo valores bastante díspares. O mesmo é verificado quando é utilizado o betume modificado. Assim, é possível afirmar que este modelo não é tão eficiente na descrição do comportamento reológico de misturas com betumes modificados (Yussof, 2012).

Outro fator importante, e já referido observado anteriormente nas curvas-mestras do ângulo de fase, é que no betume modificado o princípio da sobreposição tempo-temperatura é aplicável de forma parcial, originando problemas na construção e utilização em modelos de cuvas-mestras.

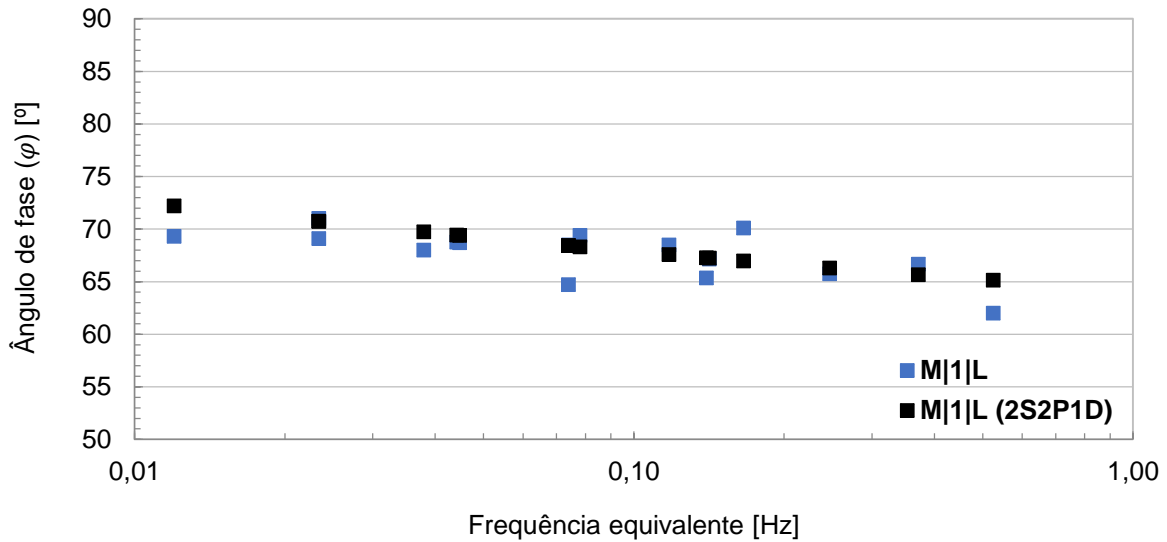


Figura 4.58 - Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.

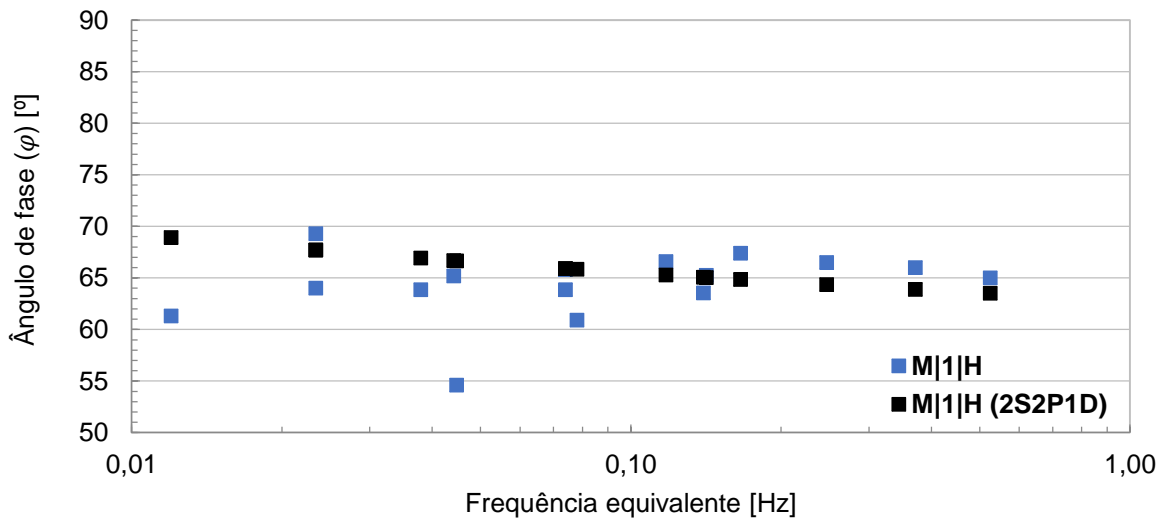


Figura 4.59 - Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.

Observa-se que existe uma variação de valores das constantes, dependendo do tipo de mastique e principalmente do tipo de betume, destacando essa variação dos valores de E_{∞} , λ e β .

De salientar que os valores deduzidos para as constantes do modelo 2S2P1D não diferem significativamente dos valores encontrados na revisão bibliográfica literatura. Assim para a constante k que controla o declive do diagrama Cole-Cole para valores elevados do módulo dissipativo obtiveram-se valores semelhantes aos que constam do Quadro 3.3. Para a constante h que controla o declive do diagrama Cole-Cole para valores baixos do módulo dissipativo obtiveram-se valores de 0,61 e de 0,68 respetivamente para os mastiques com betume puro e com betume modificado, o que é ligeiramente superior aos valores indicados no Quadro 3.3.

5. Conclusões

5.1. Considerações finais

Ao longo dos anos têm sido realizados estudos sobre os mastiques betuminosos, devido à complexidade das interações entre o fíler e o betume. Sendo considerado a fração fundamental das misturas betuminosas, o mastique influencia significativamente o seu comportamento. O fíler ao ser misturado com o betume conduz a um aumento da rigidez, conforme a concentração de material adicionado. Este material, para além do aumento da rigidez, provoca alterações no comportamento do mastique betuminoso devido às interações físico-químicas e mecânicas entre estes dois materiais. Assim no presente estudo caracterizaram-se reologicamente os mastiques betuminosos com base na determinação de propriedades viscoelásticas como o módulo complexo e o ângulo de fase, com objetivo de entender a contribuição do betume e do fíler no mastique betuminoso.

As propriedades dos mastiques betuminosos não dependem apenas dos betumes mas também das propriedades dos fíleres, pois a ligação entre o betume e as partículas de fíler depende de interações físico-químicas.

Para o presente estudo foram produzidos diferentes mastiques utilizando dois tipos de fíleres, um fíler calcário e uma cal hidráulica, e dois tipos de betumes, um betume puro e um betume modificado com polímeros. Todos os materiais utilizados na formulação dos mastiques fazem-se acompanhar de fichas técnicas onde são apresentados os valores que quantificam as suas propriedades. Assim foram produzidos trinta e seis mastiques, com razões fíler/betume (em massa) variando entre 1,0 e 1,5.

De salientar que os estudos existentes na literatura são relativamente recentes e a informação disponível sobre esta temática é limitada. Apesar de todas estas condicionantes, este estudo tornou-se ainda mais desafiante, devido ao desenvolvimento de processos e metodologias de fabrico, preparação e ensaio dos provetes.

Por se terem utilizado várias variantes de ensaio como a temperatura, a velocidade, a razão fíler/betume, a deformação imposta, o tipo de fíler e o tipo de betume, originando a ampla gama de combinações, a campanha experimental foi bastante longa. Deparam-se com alguns constrangimentos inerentes à utilização e as características do equipamento de ensaio.

Com base na análise de resultados obtidos durante o presente estudo, foram extraídas algumas conclusões:

- O tipo de ensaio (com aumento de comprimento ou com redução de comprimento) não influencia, de forma significativa, o valor do módulo complexo, sendo que os valores para o ensaio com redução de comprimento são ligeiramente superiores e que o pó de calcário é mais sensível ao tipo de ensaio;
- As deformações impostas (0,1 ou 0,2 mm) não influenciam, de forma significativa, o valor do módulo complexo, sendo que para a deformação imposta de 0,1 mm os valores são ligeiramente superiores. Os mastiques com betume puro apresentam uma maior variação quando comparados os módulos complexos para as duas amplitudes;

- O módulo complexo diminui com o aumento da temperatura, pelo que os mastiques ensaiados com a temperatura mais reduzida apresentam valores superiores de módulo complexo. Os mastiques com betume modificado apresentam valores inferiores de módulo complexo, em comparação com os mastiques com betume puro, independentemente da temperatura de ensaio;
- A diminuição do módulo complexo com o aumento da temperatura é menos acentuada nos mastiques com betume puro que nos que usam betume modificado;
- O valor do ângulo de fase sofre uma evolução crescente com o aumento da temperatura, sendo que o tipo de betume utilizado influencia esse valor. Os mastiques com betume puro sofrem um acréscimo significativo com a temperatura, enquanto para os mastiques com betume modificado esse aumento é pouco expressivo;
- Para as mesmas condições de ensaio, os mastiques com betume modificado apresentam menores ângulos de fase em comparação com os mastiques com betume puro, o que traduz uma maior elasticidade e menor componente viscosa;
- O efeito da temperatura nos mastiques com betume modificado não é tão acentuado, quando se varia o tipo de fíler. Para os mastiques com pó de calcário são verificadas maiores discrepâncias de valores de módulo complexo quando se aumenta a dosagem de fíler;
- O valor do módulo complexo aumenta à medida que a frequência aumenta, sendo que a evolução do módulo complexo é semelhante em todos os mastiques;
- À medida que a frequência aumenta, o valor do ângulo de fase diminui;
- As regressões lineares apresentadas em algumas figuras apresentam um ótimo ajuste às amostras de valores utilizados, mostrando que os resultados obtidos revelam alguma consistência;
- O aumento da concentração de fíler aumenta a rigidez dos mastiques, sendo que para mastiques com betume puro, os valores de módulo complexo são bastante superiores, com valores que quase duplicam os valores dos mastiques com betume modificado;
- O efeito do fíler de cal hidráulica é superior ao efeito do pó de calcário, conferindo aos mastiques maior rigidez;
- As curvas-mestras do módulo complexo, a uma T_{ref} de 25°C, apresentam uma boa sobreposição de resultados para as temperaturas utilizadas. Porém, para o ângulo de fase essa sobreposição é menos coerente, principalmente para mastiques com betume modificado;
- O modelo 2S2P1D revelou-se adequado para descrever o comportamento viscoelástico linear de todos os mastiques, embora não seja tão eficiente na previsão dos valores de ângulo de fase dos mastiques com betume modificado.

Sendo que os temas abordados são relativamente recentes, este estudo contribui para comparar a caracterização reológica dos mastiques realizada utilizando amostras de reduzida dimensão como ocorre em ensaios com o reómetro de corte dinâmico (DSR) com ensaios uniaxiais com provetes de maiores dimensões que possam também ser utilizados na compreensão do comportamento de misturas betuminosas que incluam partículas de maiores dimensões.

Considera-se pois que o presente estudo constitui uma contribuição para o desenvolvimento de novas metodologias de ensaio de mastiques betuminosos incluindo as técnicas de preparação de provetes e o procedimento de ensaio.

Em suma, com a realização deste estudo experimental e das conclusões que dele resultaram contribuiu-se para prever o comportamento de uma mistura betuminosa a partir dos comportamentos dos mastiques, e sugerir que os parâmetros reológicos façam parte das especificações e normas.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Apesar da diversidade de condições de ensaio utilizadas existe a necessidade de se proceder a estudos experimentais com o objetivo de serem utilizados outros parâmetros, metodologias e formulações de mastiques.

Desta forma, será necessário diversificar os materiais e as condições em que são ensaiados, nomeadamente acrescentar outros tipos de fíler às formulações dos mastiques, tendo esses fíleres diferentes origens e naturezas, outros tipos de betume, aumentar a gama de temperatura e de frequência dos ensaios.

Embora a caracterização do comportamento mecânico dos mastiques betuminosos incidisse no presente trabalho na avaliação do módulo complexo e do ângulo de fase será necessário também efetuar a avaliação da resistência à fadiga.

Um outro aspeto é a avaliação da capacidade autorregeneradora de mastiques betuminosos de forma a possibilitar avaliar o efeito do tempo de não aplicação de cargas na recuperação dos danos induzidos por aplicações de carga anteriores.

A principal finalidade do estudo realizado é permitir que em estudos posteriores seja possível correlacionar as características de misturas betuminosas com agregado de maiores dimensões (por exemplo argamassas betuminosas e betões betuminosos) com o comportamento dos mastiques betuminosos que essas misturas integram.

Referências bibliográficas

- Abbas, A.**, “*Simulation of the micromechanical Behavior of Asphalt Mixtures using the discrete element method*”, Wasshington State University, 2004.
- Airey G.**, “*Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens*”, PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 1997.
- Anderson, D., Goetz, W.**, “*Mechanical behavior and reinforcement of mineral filler-asphalt mixtures*”, Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 42, pp. 37-66, 1973.
- Antunes, V.**, “*Influência do fíler no comportamento de mastiques betuminosos*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- Antunes, V., Freire, A., Quaresma, L., Micaelo R.**, “*Influence of the geometrical and physical properties of filler in the filler–bitumen interaction.*” Construction and Building Materials, 76, 322-329, 2015.
- Bahia, H., Faheem, A., Hintz, C., Al-Qadi, I., Reinke, G., Dukatz, E.**, “*Test Methods and Specification Criteria for Mineral Used in HMA*”, Program NCHR, Editor NCHRP, Project 9-45, USA, Transportation Research Board, 2010.
- Bardini, V., Klinsky, L. Júnior, J.**, “*A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas*”, Minerva, 2009, [http://www.fipai.org.br/Minerva%2007\(01\)%2009.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2007(01)%2009.pdf), (Janeiro, 2015).
- Bardini, V., Klinsky, L., Júnior, J., Roque, R.**, “*Influência do fíler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos*”, Transportes, n.º 3, Vol. 20, pp. 19-26, 2012.
- Barnes, H., Hutton J., Walters K.**, “*An Introduction to Rheology*”, Elsevier Publishers, Amsterdam, 1989.
- Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C., Delaporte, B.**, “*Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes*”, Road Materials and Pavement Design, 5:sup1, pp. 163-202, 2004.
- Benedetto, H., Partl, M., Francken, L., Saint André, C.**, “*Stiffness testing for bituminous mixtures*”, Materials and Structures, Vol. 34, pp. 66-70, 2001.
- Bonaquist, R., Christensen, D., Stump, W.**, “*NCHRP Report 513 – Simple Performance Tester for Superpave Mix Design*”, NCHRP Project 9-29 – First-article Equipment Specifications For The Simple Performance Test Syste, 2001.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.**, “*Pavimentos Rodoviários*”, Edições Almedina, Coimbra, Portugal, 2011.
- Buttlar, W., You, Z.**, “*Discrete Element Modeling of Asphalt Concrete: a Micro-Fabric Approach*”, CD Rom, TRB 80 th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, EUA, 2001.
- Cepssa**, “*Capítulo 5: Misturas Betuminosas*”
http://www.cepsa.com/stfls/CepssaCom/Admin_WebMaster/Contenidos_comunes/Documentos/Cap%205.pdf (Janeiro, 2015).

- Cheng, J., Peng, C.,** “Analyses of Thensile Failure Properties of Asphalt-Mineral Filler Mastics”, Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 256-262, 1998.
- Clopotel, C., Bahia, H.,** “The effect of bitumen polar groups adsorption on mastics at low temperature”, Road Materials and Pavements Design, 14(sup)1, pp. 38-51, 2013.
- Craus, J., Ishai, I., Sides, A.,** “Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, CD Rom, Vol.47, 1978.
- Cuadri, A., García-Morales, M., Navarro, F., Airey, G., Partal, P.,** “End-Performance Evaluation of Thiourea-Modified Bituminous Binders though Viscous Flow and Linear Viscoelasticity Testing”, Rheologica Acta, Vol. 52:2, pp. 145-154, 2013.
- Delaport, B., Benedetto, H., Chaverot, P., Gauthier, G.,** “Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials Including New Products Made with Ultrafine Particles”, Road Materials and Pavement Design, Vol 10:1, pp. 7-38, 2009, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2009.9690180>, (Fevereiro, 2015).
- EP,** “Caderno de Encargos Tipo Obra 15.03 – Pavimentação – Métodos Construtivos”, Estradas de Portugal, S.A., 2009.
- Eurobitume,** “Rheology of Bituminous Binders: Glossary of Rheological Terms - A Practical Summary of the Most Common Concepts”, European Bitumen Association, 1996.
- Faheem, A., Bahia, H.,** “Conceptual Phenomenological Model for Internaction of Asphalt Binders With Mineral Filler”, Journal of the Association of Asphalt Paving Tecnologists, Vol. 78, 2009.
- Faheem, A., Bahia, H.,** “Modelling of Asphalt Mastic in Terms of Filler-Bitume Interaction”, Road Materials and Pavement Design, 11:sup1, pp. 281-303, 2010.
- Faheem, A., Wen, H., Stephensen L., Bahia, H.,** “Effect of Mineral Filler on Characteristic of Asphalt Binders”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 77, 2008.
- Harm, E., Hughes, C.,** “Paving Specifications and Inspection Related to Pavement Performance”, CD Rom, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 58, 1989.
- Huang, B., Xiang S., Chen, X.,** “Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory- measured properties”, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8:1, pp. 1-9, 2007.
- JAЕ,** “Caderno de Encargos Tipo Obra 15.03 – Pavimentação – Métodos Construtivos”, Junta Autónoma de Estradas, (atual Estradas de Portugal, S.A.), 1998.
- Jakami, F.,** “Adhesion of asphalt mixtures”, PhD Thesis, University of Nottingham, 2012.
- Jiménez, P., Recasens, R., Martínez, A.,** “Effect of Filler Nature and Content on the Behaviour of Bituminous Mastics”, Road Materials and Pavement Design, 9:sup1, 417-431, 2008.
- Kavussi, A., Hicks, R.,** “Properties of Bituminous Mixtures Containing Different Fillers”, CD ROM, Journal of the Association of Asphalt Paving Tecnologists, Vol. 66, 1997.

- Kim, Y., Little, D., Song, I.**, “*Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation*”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1832, pp. 1-8, 2003.
- Lee, Y.**, “*Discrete Element Modelling of Idealised Asphalt Mixture*”, PhD Thesis, The University of Nottingham, Nottingham, UK, 2006.
- Lesueur, D., Little, D.**, “*Effect of Hydrated Lime on Rheology, Fracture and Aging of Bitumen*”, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1661, pp. 93-105, 1999.
- Liao, M., Airey, G., Chen, J.**, “*Mechanical Properties of Filler-Asphalt Mastics*, *International Journal of Pavement Research and Technology*”, Vol.6.5, pp. 576-581, 2013
- Matos, P.**, “*Temperaturas de Fabrico e compactação de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados: Interação Agragado-Betume*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- Matos, P., Micaelo, R., Duarte, C.**, “*Bituminous mastic behaviour at mixing and paving temperatures: filler and bitumen influence analysis*”, 5th EATA Conference. Braunschweig, Germany, 2013.
- Micaelo, R.**, “*Compactação de Misturas Betuminosas – Ensaios de Campo e Modelação Numérica*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- Mohamed, A., Nofal, M.**, “*Structural Design of Urban Roads*”, APWA International Public Works Congress, 1998.
- Mothé, C., Correia, D., Petri, H., Mothé, M., Carestiato, T.**, “*Tradução e Adaptação do livro Reologia e Reometria: Fundamentos Teóricos e Práticos*”, Editora Art liber Ltda, São Paulo, Brasil, 2006.
- Motta, L. e Leite, L.**, “*Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas*”, 11.º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transportes, pp. 1007-1017, Rio Grande do Sul, Brasil, 2000.
- Neves, J., Correia, A.** “*Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaios de Tracção Indirecta por Compressão Diametral de Provete Cilíndrico*”, Engenharia Civil, Universidade do Minho, N.º62, pp. 61-74, Guimarães, 2006, http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/Num26/n_26_pag_61-74.pdf, (Janeiro, 2015).
- Olard, F., Di Benedetto, H.**, “*General “2S2P1D” Model and Relation between the Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Binders and Mixes*”, Road Materials and Pavement Design, Vol. 4:2, pp. 185-224, 2003.
- Pereira, A.**, “*Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de betumes com o reómetro de corte dinâmico*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- Pinilla, A.**, “*O sistema filler-betume algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas*”, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Porto Alegre, 1965.

Probigalp, Probigalp - Ligantes betuminosos S.A., disponível em http://www.probigalp.pt/pr-od_item2_frame.php (acesso em Dezembro de 2014).

Quaresma, L., *“Apontamentos disciplina de Transportes: Materiais de Pavimentação”*, Monte de Caparica, 2011.

Quaresma, L., Antunes, M., *“Fíler granítico em misturas betuminosas”*, Relatório LNEC 62/02, Lisboa, 2002.

Recasens, R., Martínez, A., Jiménez, F., Bianchetto, H., *“Effect of Filler on the Aging Potential of Asphalt Mixtures”*, Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1901, pp. 10-17, 2005.

Ribeiro, A., *“Modelação micromecânica do comportamento do mastique Betuminoso”*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

Sadd, M., Dai, Q., *“Effect of Microstructure on the Static and Dynamic Behavior of Recycled Asphalt Material”*, University of Rhode Island Transportation Center Report on Project no. 536108, University of Rhode Island, 2001.

Sadd, M., Dai, Q., Parameswaran, V., Shukla, A., *“Microstructural Simulation of Asphalt Materials: Modeling and Experimental Verification”*, 15 th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, Nova Iorque, EUA, 2002.

Santana, H., *“Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de filer em misturas asfálticas”*, 29º Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Cuiabá, Brasil, 1995.

Santos, A., *“Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados”*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

Silva, H., *“Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique: Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas”*, Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, 2005.

Smith, B., Hesp, S., *“Crack Pinning in Asphalt Mastic and Concrete: Effect of Rest Periods and Polymer Modifiers on the Fatigue Life”*, CD ROM, 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, 2000.

Soares, J., Cavalcante, V., *“O efeito do tipo e do teor de filer nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas”*, 33ª Reunião Anual de Pavimentação, 33, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2001.

Vale, C., *“Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis”*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.

Van Rompu, J., *“Etude du Comportement Mécanique des Mastics Bitumineux à L’aide D’un Rehéomètre à Cisaillement Annulaire”*, MSc Dissertation, Ecole Nationale des TPE, France, 2006.

Velho, J., Gomes, C., Romariz, C., *“Minerais Industriais”*, Gráfica de Coimbra, Coimbra, 1998.

You, Z., Buttlar, W., *“Development of a Microfabric Discrete Element Modeling Techniques to Predict Complex Modulus of Asphalt-Aggregate Hollow Cylinders Subjected to Internal Pressure”*, CD Rom. TRB 84 th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, EUA, 2005.

Yussof, N., *“Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders”*, PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 2012.

Yussof, N., Chailleux, E., Airey, G., *“A Comparative Study of the Influence of Shift Factor on Master Curve Construction”*, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 4:6, pp. 324-336, 2011.

Referências normativas

EN 14770 - *“Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR)”*, CEN, Brussels, Belgium, 2012.

EN 12697-26 - *“Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness”*, CEN, Brussels, Belgium, 2004.

EN 1426 - *“Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration”*, CEN, Brussels, Belgium, 2007.

EN 1427 - *“Bitumen and bituminous binders – Determination of softening point – Ring and Ball method”*, CEN, Brussels, Belgium, 2007.

EN 933-10 - *“Test for geometrical properties of aggregates - Part 10: Assessment of fines - Grading of filler aggregates (air jet sieving)”*, CEN, Brussels, Belgium, 2009.

NP EN 1097-4 - *“Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 4: Determinação dos vazios do fíler seco compactado”*, IPQ, Caparica, Portugal, 2012.

NP EN 1097-7 - *“Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 7: Determinação da massa volúmica do fíler - Método do picnómetro”*, IPQ, Caparica, Portugal, 2012.

NP EN 12591 - *“Betumes e ligantes betuminosos - Especificações para betumes de pavimentação”*, IPQ, Caparica, Portugal, 2011.

NP EN 12594 - *“Betumes e ligantes betuminosos - Preparação de amostras de ensaio”*, IPQ, Caparica, Portugal, 2009.

NP EN 13043 - *“Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação”*, IPQ, Caparica, Portugal, 2010.

Anexo A – Diagrama total de ensaios

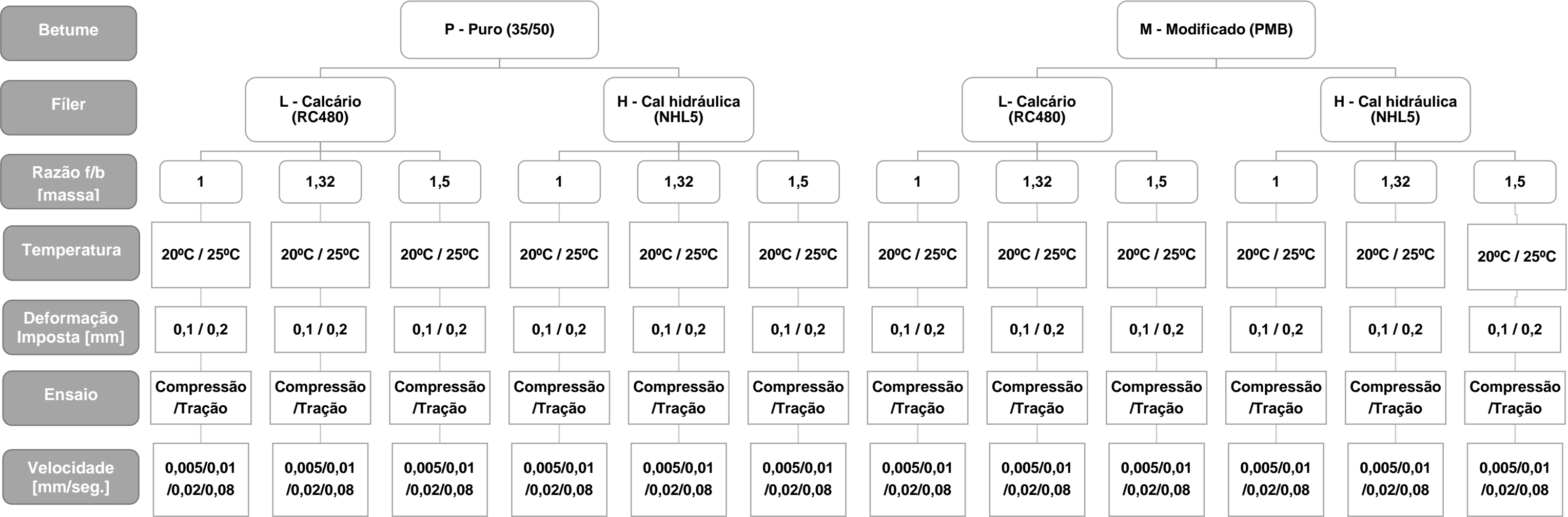


Figura A.1 – Diagrama total de ensaios.

Anexo B – Certificados de qualidade dos betumes

galp energia		Certificado de Qualidade		
LOGÍSTICA		Nº de Série (Serial Number):	076/2012	
		Data de Emissão (Issue date):	2012-03-19	
PRODUTO (Product):		Betume de Pavimentação 35/50		
LOTE (Batch nr.):		5649/016/12		
Documentos de referência:		Emitted pelo laboratório acreditado		
Relatórios de Ensaio N.º		N.º 93/L44 segundo a NP EN 150/1EC 17025		
2012010218/01/0				
MÉTODO	PROPRIEDADE		RESULTADOS	Valores limite
EN 1426	Penetração a 25°C, 100g, 5s	0.1 mm	43	35-50
EN 1427	Temperatura de Amolecimento	°C	51	50-58
EN 12595	Viscosidade Cinemática a 135 °C	mm²/s	539 t)	≥ 370
EN 12592	Solubilidade	% (m/m)	100.0 t)	≥ 99.0
EN ISO 3592	Ponto de Inflamação (Vaso Aberto)	°C	351 t)	≥ 240
EN 12595-Anexo A	Índice de Penetração	-	-1.4	-1.5 - +0.7
EN 12593	Ponto de Fragilidade Frassa	°C	-7 t)	≤ -5
EN 12605-2	Teor em Parafinas ¹	% (m/m)	< 3.0 t)	≤ 4.5
Endurecimento				
EN 12607-1	Variação de Massa	% (m/m)	0.1 t)	-0.5 - +0.5
EN 1426	Penetração a 25°C-100g-5s, (após EN 12607-1)	%	77 t)	≥ 53
Cálculo	Aumento da Temperatura de Amolecimento	°C	3 t)	≤ 11
Ensaio Adicionais				
ASTM D341mod	Temperatura para viscosidade a 170 mm²/s ²	°C	159 t)	A reportar
ASTM D341mod	Temperatura para viscosidade a 280 mm²/s ²	°C	148 t)	A reportar

ESTE DOCUMENTO SÓ PODE SER REPRODUZIDO NA ÍNTEGRA, SALVO AUTORIZAÇÃO EXPRESSA DA ARL-LOGÍSTICA. THIS DOCUMENT MAY ONLY BE REPRODUCED IN FULL, EXCEPT WITH APPROVAL OF ARL-LOGÍSTICA.

Documento inteiramente processado informaticamente. Full computer processed document

OBSERVAÇÕES (notes):

t) valores típicos (typical values)

² NPD - Desempenho não determinado (no performance determined)

¹ NK - Não requerido pela norma (no requirement)

O Responsável

[Assinatura]

Negócio de Betumes certificado de acordo com a ISO 9001:2008

CE

0066

Patilhões da Portugal - Petrolgas, S.A.

Rua Tomás de Fomelos, Torre C.

1600-209 LISBOA

10

0066-CPD-2010/CE.0129

EN 12591:2009

Betume de pavimentação 35/50

Tempo de recepção 19. Mar. 10:19

Figura B.1 – Certificado de qualidade do betume puro 35/50.



Certificado de Qualidade



Nº de série: CQ13RM094

Tipo de produto: Betume Performance PMB 45/80-65
 Local de Expedição: Rio Maior
 Lote: B13RM05/Amostra
 Data de emissão: 28-Mai-13
 Emitido pelo Laboratório de Probigalp
 Nº Amostra: A 2013/0298

Descrição do Produto:

Betume Modificado com Polímero

Características:

Propriedades (1)	Norma	Unidade	Classe	Valor	Valores	
					Min	Max
Insaios sobre betume original	Penetração a 25°C, 100g, 5s	NP EN1426	0,1 mm	Classe 4	51	45 - 80
	Temperatura de amolecimento, A&B	NP EN1427	°C	Classe 5	70,4	65
	Ponto fragilidade Fraass	EN12593	°C	Classe 7	-17 t)	-15
	Recuperação elástica a 25°C	EN13398	%	Classe 3	91 t)	70
	Estabilidade ao armazenamento	EN13399	°C	Classe 2	4,2 t)	5
	Varição da temperatura de amolecimento ou	EN1426				
	Estabilidade ao armazenamento na penetração	Varição EN13399 EN1427	0,1 mm	Classe 2	0 t)	9
Durabilidade depois do ensaio de envelhecimento (EN12607-1)	Ponto de inflamação	EN ISO2592	°C	Classe 3	335 t)	235
	Varição de massa	EN12607-1	%	Classe 5	-0,05 t)	1
	Penetração retica	EN1426	%	Classe 7	96 t)	60
	Aumento de temperatura de amolecimento	EN1427	°C	Classe 3	-2,6 t)	10

Observações:

t) Valor de referência

Notas:

[1] - De acordo com a Norma Europeia EN 14023:2010 - Especificações de betumes modificados com polímero.



P/e Responsável:

probigalp
 Augusto Almeida
 28-Mai-13
 Ligantes Betuminosos, SA

Nota: Documento produzido por computador. Quando enviado por via eletrónica não necessita assinatura.

Probigalp - Ligantes Betuminosos, SA | Zona Industrial de Rio Maior | 2040-998 Rio Maior | 00351 243 999 240 | rmaior@probigalp.pt

Mod 0233.00

Página 1 de 1

Figura B.2 – Certificado de qualidade do betume modificado PMB 45/80-65


Anexo C – Certificado de qualidade dos fíleres



DECLARAÇÃO DE CONFORMIDADE CE


SECIL MARTINGANÇA, SA	
Sede:	Fábrica:
Apartado 2 EC MACEIRA	Rua do Mercado, s/nº
2405-909 MACEIRA LRA	2405-018 MACEIRA LRA
Telef. 244 770 220 Fax 244 777 997	Telef. 244 770 220 Fax 244 777 997
e-mail: geral@secilmartinganca.pt	
www.secilmartinganca.pt	

Filer Comercial - Cal Hidráulica Natural NHL5

 09	Norma de referência: NP EN 13043
	Utilização prevista: Agregado para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.
Características	
Granulometria:	% de passado (massa)
2 mm	100
0,125 mm	95 ± 5
0,063 mm	80 ± 5
Teor em água	≤ 1 %
Finura (blaine)	5000 ± 600 cm²/g
Massa Volumétrica do Filer	2,70 a 2,90 Mg/m³
Variação de filer seco compactado	28/45 v
Variação de temperatura anel e bola	CND ⁽¹⁾
Número de betume do filer comercial	CND ⁽¹⁾
Solubilidade em água	WS _u
Susceptibilidade em água	CND ⁽¹⁾
Azul de metileno	MS _{rel}
Massa Volumétrica aparente (querosene)	0,5 a 0,9 Mg/m³

(1) - desempenho não determinado (anexo ZA, secção ZA, 1 da NP EN 13043)

Certificado de Controlo de Produção da Fábrica
1328 - CPD - 0148

Director Geral

Laila Gedeira dos Santos

11 de Novembro de 2015

TC.E.03501

SECIL MARTINGANÇA S.A.
Apartado 2
2405-909 MACEIRA LRA - PORTUGAL
Tel: 244 770 220 - Fax: 244 777 997
geral@secilmartinganca.pt
www.secilmartinganca.pt

Figura C.1 - Certificado de qualidade do filer cal hidráulica (NHL5).



eurocácio
CALCÁRIOS E INERTES, SA

FICHA TÉCNICA DO PRODUTO Nº01 - Rev.3



EUROCÁCIO - Calcários e Inertes, SA
Vale do Queiro, S. Marinho - Apartado 96 - 3495-005 Filões
Centro de Produção: Fábrica "Vale do Queiro"


06	05	
NP EN 12642:2004 Agregados Máximos Betonários CCPF Nº 1029 - CPD - PT06001944	EN 12620:2002+A1:2008 Agregados para Betão CCPF Nº 1028 - CPD - PT06001473	NP EN 12139:2005 Agregados para Argamassas CCPF Nº 1028 - CPD - PT06001473

Tipo de agregado:	Filer	Ref. Normativa	EN 12620+A1	NP EN 12642	NP EN 12139
Origem:	RC 480		Betão	Máx. Betonários	Argamassas
REQUISITOS FÍSICOS					
Qualidade dos Fileres - Azul Molhado	NPEN 033-0	11	≤ 1,5 MB g/kg	11	≤ 1,5 MB g/kg
Massa Volumétrica das partículas	NPEN 100-1	11	≥ 2,71 Mg/m³	11	≥ 2,71 Mg/m³
Taxa de Humidade	NPEN 030-0	11	≤ 0,5 %	11	≤ 0,5 %
Viscosidade do Filer sobre compactação (Pigmentos)	EN 1067-4		DN0		
"Viscosidade da temperatura (areia e betão)"	EN 12179-1		DN0		
Substância na Água	EN 1744-1, método 16	11	≤ 0,2%		
Disponibilidade à Água	NPEN 1744-1		DN0		
"Tensão de Inércia"	EN 12179-2		DN0		
Superfície Específica - Método Eléctrico	NP EN 106-0	11	≥ 3800 cm²/g		
Durabilidade - Resistência Alcalo-Silica	ASTM 1289	11	≤ 0,00%		11
REQUISITOS QUÍMICOS					
Taxa de Clorureto		11	≤ 0,01%		11
Sulfatos solúveis em ácido		11	Até		Até
Sulfato total	NPEN 1744-1	11	≤ 0,04%		11
Taxa de ferro		11	≤ 1A		11
Contaminantes Orgânicos Livres		11	≤ 1A		11
Taxa de Carbonato	NPEN 106-21	11	44,1%		
	Cálculo	11	89,1%		
Descrição Petrográfica Simplificada: NP EN 910-2:2002 "R"	Agregado	Materiais	Forma e Angularidade		Condições de superfície
	Fragmentos de rocha	Calcário	Isométrico	Amplamente arredondado	Regular
			Sub-esférico a sub-difuso	Muito regular a sub-angular	

Nota: Produto extraído a partir de pedras naturais, pelo que está sujeito a algumas variações locais resultantes do processo de extração da própria pedra.

GRANULOMETRIA

Malha	Granulometria Típica %	Tolerâncias	
		Valor Mínimo	Valor Máximo
2	100	100	100
0,125	99	98	100
0,063	83,0	70,0	98,0



LEGENDA:

11 - valor declarado

11 - tolerância

1A - limite superior

DN0 - Tolerância Não Determinada

Elaborou:

Aprovou:

Data: 10-02-2011

Figura C.2- Certificado de qualidade do filer calcário (RC480).



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I.P.
 Departamento de Transportes
 Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias
 Laboratório de Ensaio de Materiais para Pavimentação

Boletim nº 30 DT/10
 Pág. 1/1
 Pedido nº 1/10
 Visto Eng. A. L. Macedo


Cliente: CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO
 Rua Coronel Velga Simão
 Apartado 8052
 3020-901 Coimbra

V.º Refº : Documento Nº 33 de 2010/01/20

I – IDENTIFICAÇÃO

A amostra recebida no NIRA em 2010-01-21, e referenciada pelo requerente como “Amostra de filer”, foi registada no LNEC/PAVMAT com o número 01/10.

II – ENSAIOS REALIZADOS SEGUNDO SOLICITAÇÃO DO REQUERENTE

II.1 Determinação dos vazios do filer compactado

O ensaio foi realizado entre 2010-01-25 e 2010-01-27 segundo a Norma Portuguesa NP EN 1097-4:2003 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 4: Determinação dos vazios do filer seco compactado”.

Resultado do ensaio:

Amostra 01/10	
Valor médio dos volumes de vazios (%)	32



FC/
 LNEC/DT
 Av. do Brasil, 101 1700-086 LISBOA PORTUGAL
 Tel. +351. 21 844 3552 Fax. +351. 21 844 3329
 Pers. Colectiva 501 269 660

O Chefe do Laboratório de Ensaios
 LNEC/PAVMAT

 Eng.ª Ana Cristina Freire
 2010-02-12

Figura C.3- Certificado de qualidade do filer calcário (RC480) - IVR

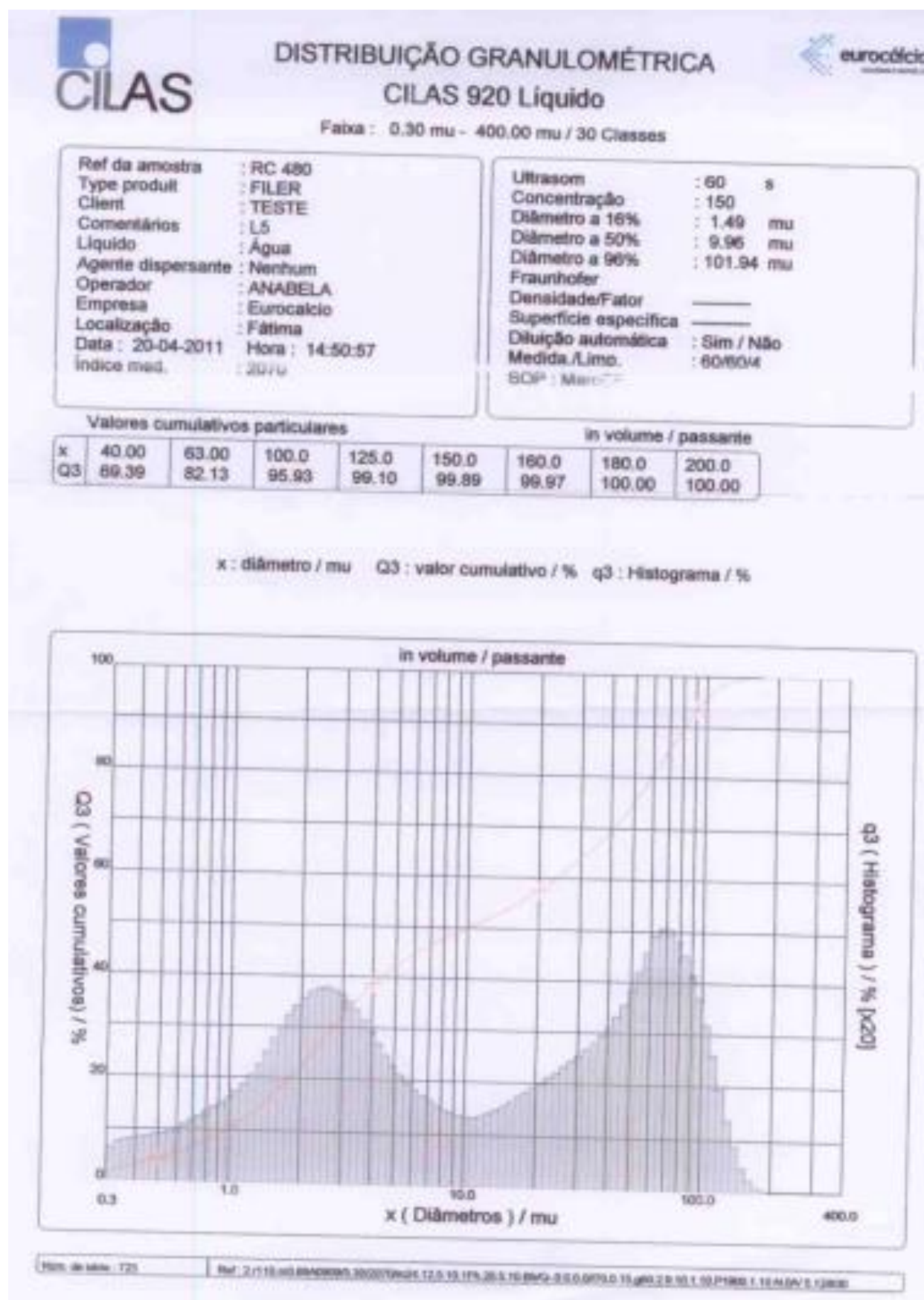


Figura C.4 - Certificado de qualidade do filer calcário (RC480) – Distribuição granulométrica.

Anexo D – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase obtidos para mastiques com betume puro 35/50 (P) para o fíler calcário (L) e cal hidráulica (H), para diferentes velocidades, deformações impostas e temperaturas

Quadro D.1 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e pó de calcário (L), com razão f/b de 1.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1 L 0,1 20 C 0,005	0,02	76,8	280	P 1 L 0,1 25 C 0,005	0,02	80,9	138
P 1 L 0,1 20 C 0,01	0,04	73,6	500	P 1 L 0,1 25 C 0,01	0,04	74,7	236
P 1 L 0,1 20 C 0,02	0,08	72,8	860	P 1 L 0,1 25 C 0,02	0,08	75,3	371
P 1 L 0,1 20 C 0,08	0,17	67,0	1747	P 1 L 0,1 25 C 0,08	0,17	75,1	796
P 1 L 0,1 20 T 0,005	0,02	75,1	274	P 1 L 0,1 25 T 0,005	0,02	78,4	99
P 1 L 0,1 20 T 0,01	0,04	73,6	478	P 1 L 0,1 25 T 0,01	0,04	75,6	154
P 1 L 0,1 20 T 0,02	0,08	73,1	819	P 1 L 0,1 25 T 0,02	0,08	76,4	256
P 1 L 0,1 20 T 0,08	0,17	58,9	1527	P 1 L 0,1 25 T 0,08	0,17	75,5	539
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1 L 0,2 20 C 0,005	0,01	76,9	140	P 1 L 0,2 25 C 0,005	0,01	80,6	39
P 1 L 0,2 20 C 0,01	0,02	76,2	258	P 1 L 0,2 25 C 0,01	0,02	77,2	64
P 1 L 0,2 20 C 0,02	0,04	75,2	459	P 1 L 0,2 25 C 0,02	0,04	78,6	111
P 1 L 0,2 20 C 0,08	0,12	63,1	1013	P 1 L 0,2 25 C 0,08	0,12	77,6	292
P 1 L 0,2 20 T 0,005	0,01	76,2	127	P 1 L 0,2 25 T 0,005	0,01	77,0	47
P 1 L 0,2 20 T 0,01	0,02	75,6	215	P 1 L 0,2 25 T 0,01	0,02	77,3	86
P 1 L 0,2 20 T 0,02	0,04	74,4	375	P 1 L 0,2 25 T 0,02	0,04	78,9	145
P 1 L 0,2 20 T 0,08	0,12	68,5	893	P 1 L 0,2 25 T 0,08	0,12	77,1	413

Quadro D.2 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e pó de calcário (L), com razão f/b de 1,32.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1,32 L 0,1 20 C 0,005	0,02	69,4	787	P 1,32 L 0,1 25 C 0,005	0,02	76,0	175
P 1,32 L 0,1 20 C 0,01	0,04	68,3	1112	P 1,32 L 0,1 25 C 0,01	0,04	76,6	238
P 1,32 L 0,1 20 C 0,02	0,08	66,8	1708	P 1,32 L 0,1 25 C 0,02	0,08	74,5	409
P 1,32 L 0,1 20 C 0,08	0,17	54,9	2199	P 1,32 L 0,1 25 C 0,08	0,17	74,4	883
P 1,32 L 0,1 20 T 0,005	0,02	71,7	491	P 1,32 L 0,1 25 T 0,005	0,02	76,8	112
P 1,32 L 0,1 20 T 0,01	0,04	69,7	760	P 1,32 L 0,1 25 T 0,01	0,04	76,1	216
P 1,32 L 0,1 20 T 0,02	0,08	68,7	1214	P 1,32 L 0,1 25 T 0,02	0,08	75,7	359
P 1,32 L 0,1 20 T 0,08	0,17	68,7	1694	P 1,32 L 0,1 25 T 0,08	0,17	74,4	802
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1,32 L 0,2 20 C 0,005	0,01	76,4	180	P 1,32 L 0,2 25 C 0,005	0,01	80,4	59
P 1,32 L 0,2 20 C 0,01	0,02	75,0	290	P 1,32 L 0,2 25 C 0,01	0,02	76,3	115
P 1,32 L 0,2 20 C 0,02	0,04	73,8	482	P 1,32 L 0,2 25 C 0,02	0,04	76,4	196
P 1,32 L 0,2 20 C 0,08	0,12	66,1	1056	P 1,32 L 0,2 25 C 0,08	0,12	75,4	550
P 1,32 L 0,2 20 T 0,005	0,01	78,6	137	P 1,32 L 0,2 25 T 0,005	0,01	77,2	48
P 1,32 L 0,2 20 T 0,01	0,02	75,4	253	P 1,32 L 0,2 25 T 0,01	0,02	75,4	99
P 1,32 L 0,2 20 T 0,02	0,04	75,1	427	P 1,32 L 0,2 25 T 0,02	0,04	77,0	155
P 1,32 L 0,2 20 T 0,08	0,12	68,5	1013	P 1,32 L 0,2 25 T 0,08	0,12	75,8	428

Quadro D.3 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mástico com betume puro (P) e pó de calcário (L), com razão f/b de 1,5.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1,5 L 0,1 20 C 0,005	0,02	60,4	1113	P 1,5 L 0,1 25 C 0,005	0,02	75,9	164
P 1,5 L 0,1 20 C 0,01	0,04	57,5	1469	P 1,5 L 0,1 25 C 0,01	0,04	76,9	262
P 1,5 L 0,1 20 C 0,02	0,08	54,8	1798	P 1,5 L 0,1 25 C 0,02	0,08	75,1	454
P 1,5 L 0,1 20 C 0,08	0,17	46,6	2962	P 1,5 L 0,1 25 C 0,08	0,17	74,8	1023
P 1,5 L 0,1 20 T 0,005	0,02	69,6	577	P 1,5 L 0,1 25 T 0,005	0,02	78,3	140
P 1,5 L 0,1 20 T 0,01	0,04	68,3	911	P 1,5 L 0,1 25 T 0,01	0,04	77,6	258
P 1,5 L 0,1 20 T 0,02	0,08	64,0	1465	P 1,5 L 0,1 25 T 0,02	0,08	76,3	453
P 1,5 L 0,1 20 T 0,08	0,17	52,8	2618	P 1,5 L 0,1 25 T 0,08	0,17	74,9	1013
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1,5 L 0,2 20 C 0,005	0,01	74,5	326	P 1,5 L 0,2 25 C 0,005	0,01	76,9	74
P 1,5 L 0,2 20 C 0,01	0,02	73,6	513	P 1,5 L 0,2 25 C 0,01	0,02	78,2	140
P 1,5 L 0,2 20 C 0,02	0,04	70,9	769	P 1,5 L 0,2 25 C 0,02	0,04	76,6	263
P 1,5 L 0,2 20 C 0,08	0,12	58,1	1199	P 1,5 L 0,2 25 C 0,08	0,12	75,8	715
P 1,5 L 0,2 20 T 0,005	0,01	76,6	227	P 1,5 L 0,2 25 T 0,005	0,01	77,9	78
P 1,5 L 0,2 20 T 0,01	0,02	75,0	391	P 1,5 L 0,2 25 T 0,01	0,02	79,4	141
P 1,5 L 0,2 20 T 0,02	0,04	74,2	642	P 1,5 L 0,2 25 T 0,02	0,04	76,7	255
P 1,5 L 0,2 20 T 0,08	0,12	61,7	1036	P 1,5 L 0,2 25 T 0,08	0,12	75,9	698

Quadro D.4 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mástico com betume puro (P) e filer de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1 H 0,1 20 C 0,005	0,02	71,5	548	P 1 H 0,1 25 C 0,005	0,02	73,3	145
P 1 H 0,1 20 C 0,01	0,04	71,4	888	P 1 H 0,1 25 C 0,01	0,04	73,3	239
P 1 H 0,1 20 C 0,02	0,08	57,1	1468	P 1 H 0,1 25 C 0,02	0,08	74,7	398
P 1 H 0,1 20 C 0,08	0,17	54,1	1999	P 1 H 0,1 25 C 0,08	0,17	74,3	874
P 1 H 0,1 20 T 0,005	0,02	73,7	420	P 1 H 0,1 25 T 0,005	0,02	72,7	139
P 1 H 0,1 20 T 0,01	0,04	72,6	704	P 1 H 0,1 25 T 0,01	0,04	72,6	231
P 1 H 0,1 20 T 0,02	0,08	71,2	1172	P 1 H 0,1 25 T 0,02	0,08	73,3	391
P 1 H 0,1 20 T 0,08	0,17	53,0	1819	P 1 H 0,1 25 T 0,08	0,17	74,6	831
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1 H 0,2 20 C 0,005	0,01	75,5	224	P 1 H 0,2 25 C 0,005	0,01	73,7	77
P 1 H 0,2 20 C 0,01	0,02	74,8	354	P 1 H 0,2 25 C 0,01	0,02	73,1	120
P 1 H 0,2 20 C 0,02	0,04	73,6	593	P 1 H 0,2 25 C 0,02	0,04	75,0	214
P 1 H 0,2 20 C 0,08	0,12	57,5	1065	P 1 H 0,2 25 C 0,08	0,12	74,9	541
P 1 H 0,2 20 T 0,005	0,01	76,2	178	P 1 H 0,2 25 T 0,005	0,01	75,1	69
P 1 H 0,2 20 T 0,01	0,02	75,4	310	P 1 H 0,2 25 T 0,01	0,02	73,7	124
P 1 H 0,2 20 T 0,02	0,04	74,5	530	P 1 H 0,2 25 T 0,02	0,04	74,2	215
P 1 H 0,2 20 T 0,08	0,12	60,2	1007	P 1 H 0,2 25 T 0,08	0,12	75,1	556

Quadro D.5 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1,32.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1,32 H 0,1 20 C 0,005	0,02	71,6	666	P 1,32 H 0,1 25 C 0,005	0,02	69,9	195
P 1,32 H 0,1 20 C 0,01	0,04	71,6	962	P 1,32 H 0,1 25 C 0,01	0,04	72,2	367
P 1,32 H 0,1 20 C 0,02	0,08	68,6	1392	P 1,32 H 0,1 25 C 0,02	0,08	73,1	634
P 1,32 H 0,1 20 C 0,08	0,17	52,9	2022	P 1,32 H 0,1 25 C 0,08	0,17	71,1	1302
P 1,32 H 0,1 20 T 0,005	0,02	69,6	583	P 1,32 H 0,1 25 T 0,005	0,02	74,0	199
P 1,32 H 0,1 20 T 0,01	0,04	67,8	903	P 1,32 H 0,1 25 T 0,01	0,04	73,2	344
P 1,32 H 0,1 20 T 0,02	0,08	71,2	1172	P 1,32 H 0,1 25 T 0,02	0,08	72,5	586
P 1,32 H 0,1 20 T 0,08	0,17	57,1	1840	P 1,32 H 0,1 25 T 0,08	0,17	71,5	1268
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1,32 H 0,2 20 C 0,005	0,01	73,8	275	P 1,32 H 0,2 25 C 0,005	0,01	75,4	99
P 1,32 H 0,2 20 C 0,01	0,02	72,5	426	P 1,32 H 0,2 25 C 0,01	0,02	75,3	184
P 1,32 H 0,2 20 C 0,02	0,04	70,6	828	P 1,32 H 0,2 25 C 0,02	0,04	73,6	320
P 1,32 H 0,2 20 C 0,08	0,12	51,5	1371	P 1,32 H 0,2 25 C 0,08	0,12	72,3	852
P 1,32 H 0,2 20 T 0,005	0,01	75,5	183	P 1,32 H 0,2 25 T 0,005	0,01	77,7	103
P 1,32 H 0,2 20 T 0,01	0,02	73,5	310	P 1,32 H 0,2 25 T 0,01	0,02	74,3	180
P 1,32 H 0,2 20 T 0,02	0,04	72,2	616	P 1,32 H 0,2 25 T 0,02	0,04	74,4	312
P 1,32 H 0,2 20 T 0,08	0,12	59,7	1224	P 1,32 H 0,2 25 T 0,08	0,12	72,6	829

Quadro D.6 – Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1,5.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1,5 H 0,1 20 C 0,005	0,02	65,1	1011	P 1,5 H 0,1 25 C 0,005	0,02	70,7	363
P 1,5 H 0,1 20 C 0,01	0,04	63,9	1253	P 1,5 H 0,1 25 C 0,01	0,04	72,3	614
P 1,5 H 0,1 20 C 0,02	0,08	70,0	1600	P 1,5 H 0,1 25 C 0,02	0,08	72,4	1029
P 1,5 H 0,1 20 C 0,08	0,17	59,1	2458	P 1,5 H 0,1 25 C 0,08	0,17	65,8	1848
P 1,5 H 0,1 20 T 0,005	0,02	74,0	494	P 1,5 H 0,1 25 T 0,005	0,02	75,2	310
P 1,5 H 0,1 20 T 0,01	0,04	72,9	845	P 1,5 H 0,1 25 T 0,01	0,04	71,4	515
P 1,5 H 0,1 20 T 0,02	0,08	71,7	1423	P 1,5 H 0,1 25 T 0,02	0,08	73,1	841
P 1,5 H 0,1 20 T 0,08	0,17	55,7	2212	P 1,5 H 0,1 25 T 0,08	0,17	70,4	1608
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
P 1,5 H 0,2 20 C 0,005	0,01	73,7	303	P 1,5 H 0,2 25 C 0,005	0,01	76,0	145
P 1,5 H 0,2 20 C 0,01	0,02	73,2	507	P 1,5 H 0,2 25 C 0,01	0,02	75,6	222
P 1,5 H 0,2 20 C 0,02	0,04	72,9	867	P 1,5 H 0,2 25 C 0,02	0,04	75,1	384
P 1,5 H 0,2 20 C 0,08	0,12	53,9	1534	P 1,5 H 0,2 25 C 0,08	0,12	71,7	944
P 1,5 H 0,2 20 T 0,005	0,01	75,8	256	P 1,5 H 0,2 25 T 0,005	0,01	75,2	117
P 1,5 H 0,2 20 T 0,01	0,02	73,1	450	P 1,5 H 0,2 25 T 0,01	0,02	76,0	181
P 1,5 H 0,2 20 T 0,02	0,04	73,2	782	P 1,5 H 0,2 25 T 0,02	0,04	72,9	343
P 1,5 H 0,2 20 T 0,08	0,12	51,8	1396	P 1,5 H 0,2 25 T 0,08	0,12	70,7	840

Anexo E – Valores médios do módulo complexo e do ângulo de fase obtidos para mastiques com betume modificado PMB (M) para o fíler calcário (L) e cal hidráulica (H), para diferentes velocidades, deformações impostas e temperaturas

Quadro E.1 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e pó de calcário (L), com razão f/b de 1.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1 L 0,1 20 C 0,005	0,02	64,7	272,0	M 1 L 0,1 25 C 0,005	0,02	69,1	76,4
M 1 L 0,1 20 C 0,01	0,04	65,4	411,5	M 1 L 0,1 25 C 0,01	0,04	68,7	82,5
M 1 L 0,1 20 C 0,02	0,08	65,8	630,3	M 1 L 0,1 25 C 0,02	0,08	69,4	120,2
M 1 L 0,1 20 C 0,08	0,17	62,0	1158,6	M 1 L 0,1 25 C 0,08	0,17	70,1	237,3
M 1 L 0,1 20 T 0,005	0,02	68,0	210,3	M 1 L 0,1 25 T 0,005	0,02	66,7	61,7
M 1 L 0,1 20 T 0,01	0,04	66,0	335,4	M 1 L 0,1 25 T 0,01	0,04	65,8	111,5
M 1 L 0,1 20 T 0,02	0,08	66,0	518,5	M 1 L 0,1 25 T 0,02	0,08	67,5	97,3
M 1 L 0,1 20 T 0,08	0,17	65,9	898,4	M 1 L 0,1 25 T 0,08	0,17	67,4	172,1
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1 L 0,2 20 C 0,005	0,01	68,0	94,6	M 1 L 0,2 25 C 0,005	0,01	69,3	31,8
M 1 L 0,2 20 C 0,01	0,02	68,5	151,0	M 1 L 0,2 25 C 0,01	0,02	71,0	63,4
M 1 L 0,2 20 C 0,02	0,04	67,2	245,9	M 1 L 0,2 25 C 0,02	0,04	68,8	95,7
M 1 L 0,2 20 C 0,08	0,12	66,7	605,0	M 1 L 0,2 25 C 0,08	0,12	68,5	209,5
M 1 L 0,2 20 T 0,005	0,01	69,5	78,7	M 1 L 0,2 25 T 0,005	0,01	71,8	25,7
M 1 L 0,2 20 T 0,01	0,02	67,8	122,1	M 1 L 0,2 25 T 0,01	0,02	68,7	42,3
M 1 L 0,2 20 T 0,02	0,04	68,0	200,4	M 1 L 0,2 25 T 0,02	0,04	67,4	74,6
M 1 L 0,2 20 T 0,08	0,12	67,9	477,1	M 1 L 0,2 25 T 0,08	0,12	68,8	185,4

Quadro E.2 Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e pó de calcário (L), com razão f/b de 1,32.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1,32 L 0,1 20 C 0,005	0,02	66,1	290,3	M 1,32 L 0,1 25 C 0,005	0,02	69,5	109,5
M 1,32 L 0,1 20 C 0,01	0,04	65,8	450,0	M 1,32 L 0,1 25 C 0,01	0,04	69,9	172,7
M 1,32 L 0,1 20 C 0,02	0,08	65,5	710,1	M 1,32 L 0,1 25 C 0,02	0,08	67,8	281,1
M 1,32 L 0,1 20 C 0,08	0,17	62,5	1278,8	M 1,32 L 0,1 25 C 0,08	0,17	68,4	557,2
M 1,32 L 0,1 20 T 0,005	0,02	65,9	234,4	M 1,32 L 0,1 25 T 0,005	0,02	62,0	90,1
M 1,32 L 0,1 20 T 0,01	0,04	66,3	373,7	M 1,32 L 0,1 25 T 0,01	0,04	66,8	150,2
M 1,32 L 0,1 20 T 0,02	0,08	66,4	537,3	M 1,32 L 0,1 25 T 0,02	0,08	70,3	246,0
M 1,32 L 0,1 20 T 0,08	0,17	64,7	1084,3	M 1,32 L 0,1 25 T 0,08	0,17	69,0	480,8
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1,32 L 0,2 20 C 0,005	0,01	65,9	102,9	M 1,32 L 0,2 25 C 0,005	0,01	62,5	63,3
M 1,32 L 0,2 20 C 0,01	0,02	67,1	160,7	M 1,32 L 0,2 25 C 0,01	0,02	68,1	84,0
M 1,32 L 0,2 20 C 0,02	0,04	68,1	259,0	M 1,32 L 0,2 25 C 0,02	0,04	68,1	121,0
M 1,32 L 0,2 20 C 0,08	0,12	65,5	607,6	M 1,32 L 0,2 25 C 0,08	0,12	68,3	253,6
M 1,32 L 0,2 20 T 0,005	0,01	68,1	81,6	M 1,32 L 0,2 25 T 0,005	0,01	68,4	46,6
M 1,32 L 0,2 20 T 0,01	0,02	68,1	137,0	M 1,32 L 0,2 25 T 0,01	0,02	62,8	70,3
M 1,32 L 0,2 20 T 0,02	0,04	67,0	221,2	M 1,32 L 0,2 25 T 0,02	0,04	66,3	105,2
M 1,32 L 0,2 20 T 0,08	0,12	67,0	551,8	M 1,32 L 0,2 25 T 0,08	0,12	68,8	217,5

Quadro E.3 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e pó de calcário (L), com razão f/b de 1,5.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1,5 L 0,1 20 C 0,005	0,02	67,9	368,5	M 1,5 L 0,1 25 C 0,005	0,02	66,9	121,5
M 1,5 L 0,1 20 C 0,01	0,04	65,2	548,5	M 1,5 L 0,1 25 C 0,01	0,04	64,8	199,4
M 1,5 L 0,1 20 C 0,02	0,08	67,0	818,2	M 1,5 L 0,1 25 C 0,02	0,08	68,3	337,9
M 1,5 L 0,1 20 C 0,08	0,17	62,6	1493,3	M 1,5 L 0,1 25 C 0,08	0,17	67,4	600,0
M 1,5 L 0,1 20 T 0,005	0,02	67,9	249,3	M 1,5 L 0,1 25 T 0,005	0,02	65,2	118,4
M 1,5 L 0,1 20 T 0,01	0,04	66,8	389,4	M 1,5 L 0,1 25 T 0,01	0,04	67,8	185,6
M 1,5 L 0,1 20 T 0,02	0,08	67,1	593,8	M 1,5 L 0,1 25 T 0,02	0,08	69,4	285,2
M 1,5 L 0,1 20 T 0,08	0,17	65,7	1158,1	M 1,5 L 0,1 25 T 0,08	0,17	68,5	506,7
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1,5 L 0,2 20 C 0,005	0,01	70,3	122,7	M 1,5 L 0,2 25 C 0,005	0,01	71,2	67,5
M 1,5 L 0,2 20 C 0,01	0,02	68,3	189,4	M 1,5 L 0,2 25 C 0,01	0,02	68,2	105,3
M 1,5 L 0,2 20 C 0,02	0,04	67,6	313,0	M 1,5 L 0,2 25 C 0,02	0,04	68,4	175,5
M 1,5 L 0,2 20 C 0,08	0,12	67,7	729,6	M 1,5 L 0,2 25 C 0,08	0,12	69,6	389,8
M 1,5 L 0,2 20 T 0,005	0,01	67,4	99,5	M 1,5 L 0,2 25 T 0,005	0,01	71,3	62,0
M 1,5 L 0,2 20 T 0,01	0,02	66,3	163,7	M 1,5 L 0,2 25 T 0,01	0,02	68,4	98,9
M 1,5 L 0,2 20 T 0,02	0,04	67,8	266,3	M 1,5 L 0,2 25 T 0,02	0,04	68,5	165,9
M 1,5 L 0,2 20 T 0,08	0,12	67,8	644,6	M 1,5 L 0,2 25 T 0,08	0,12	68,6	417,4

Quadro E.4 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e filler de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1 H 0,1 20 C 0,005	0,02	65,8	252,9	M 1 H 0,1 25 C 0,005	0,02	69,3	77,4
M 1 H 0,1 20 C 0,01	0,04	63,6	328,2	M 1 H 0,1 25 C 0,01	0,04	54,6	123,2
M 1 H 0,1 20 C 0,02	0,08	66,5	517,7	M 1 H 0,1 25 C 0,02	0,08	60,9	201,7
M 1 H 0,1 20 C 0,08	0,17	65,0	1034,1	M 1 H 0,1 25 C 0,08	0,17	67,4	409,0
M 1 H 0,1 20 T 0,005	0,02	65,5	177,0	M 1 H 0,1 25 T 0,005	0,02	71,2	69,7
M 1 H 0,1 20 T 0,01	0,04	64,3	277,8	M 1 H 0,1 25 T 0,01	0,04	68,0	99,9
M 1 H 0,1 20 T 0,02	0,08	65,3	450,2	M 1 H 0,1 25 T 0,02	0,08	60,0	187,4
M 1 H 0,1 20 T 0,08	0,17	65,0	1011,5	M 1 H 0,1 25 T 0,08	0,17	65,1	393,7
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1 H 0,2 20 C 0,005	0,01	63,9	93,6	M 1 H 0,2 25 C 0,005	0,01	61,3	48,6
M 1 H 0,2 20 C 0,01	0,02	63,9	144,3	M 1 H 0,2 25 C 0,01	0,02	64,0	82,5
M 1 H 0,2 20 C 0,02	0,04	65,3	234,0	M 1 H 0,2 25 C 0,02	0,04	65,2	133,7
M 1 H 0,2 20 C 0,08	0,12	66,0	555,3	M 1 H 0,2 25 C 0,08	0,12	66,6	327,0
M 1 H 0,2 20 T 0,005	0,01	65,2	81,7	M 1 H 0,2 25 T 0,005	0,01	65,2	45,8
M 1 H 0,2 20 T 0,01	0,02	64,2	124,0	M 1 H 0,2 25 T 0,01	0,02	67,1	69,0
M 1 H 0,2 20 T 0,02	0,04	64,6	199,4	M 1 H 0,2 25 T 0,02	0,04	68,7	116,1
M 1 H 0,2 20 T 0,08	0,12	66,2	482,2	M 1 H 0,2 25 T 0,08	0,12	68,4	282,9

Quadro E.5 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e filer de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1,32.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1,32 H 0,1 20 C 0,005	0,02	60,6	428,3	M 1,32 H 0,1 25 C 0,005	0,02	60,0	132,9
M 1,32 H 0,1 20 C 0,01	0,04	60,4	611,9	M 1,32 H 0,1 25 C 0,01	0,04	60,3	223,6
M 1,32 H 0,1 20 C 0,02	0,08	62,3	939,4	M 1,32 H 0,1 25 C 0,02	0,08	60,6	309,1
M 1,32 H 0,1 20 C 0,08	0,17	59,7	1686,3	M 1,32 H 0,1 25 C 0,08	0,17	62,9	670,7
M 1,32 H 0,1 20 T 0,005	0,02	62,3	335,6	M 1,32 H 0,1 25 T 0,005	0,02	61,3	131,4
M 1,32 H 0,1 20 T 0,01	0,04	61,9	504,7	M 1,32 H 0,1 25 T 0,01	0,04	62,1	175,7
M 1,32 H 0,1 20 T 0,02	0,08	62,4	768,0	M 1,32 H 0,1 25 T 0,02	0,08	61,4	262,8
M 1,32 H 0,1 20 T 0,08	0,17	62,1	1417,4	M 1,32 H 0,1 25 T 0,08	0,17	64,0	540,4
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1,32 H 0,2 20 C 0,005	0,01	60,3	202,7	M 1,32 H 0,2 25 C 0,005	0,01	60,0	65,4
M 1,32 H 0,2 20 C 0,01	0,02	60,4	296,9	M 1,32 H 0,2 25 C 0,01	0,02	61,2	85,4
M 1,32 H 0,2 20 C 0,02	0,04	62,9	430,0	M 1,32 H 0,2 25 C 0,02	0,04	61,4	142,3
M 1,32 H 0,2 20 C 0,08	0,12	62,4	871,5	M 1,32 H 0,2 25 C 0,08	0,12	61,5	367,9
M 1,32 H 0,2 20 T 0,005	0,01	61,8	160,7	M 1,32 H 0,2 25 T 0,005	0,01	60,5	53,2
M 1,32 H 0,2 20 T 0,01	0,02	62,0	232,0	M 1,32 H 0,2 25 T 0,01	0,02	61,0	73,2
M 1,32 H 0,2 20 T 0,02	0,04	64,4	348,9	M 1,32 H 0,2 25 T 0,02	0,04	62,2	123,4
M 1,32 H 0,2 20 T 0,08	0,12	63,7	725,9	M 1,32 H 0,2 25 T 0,08	0,12	63,0	299,1

Quadro E.6 - Valores médios do módulo complexo e ângulo de fase do mastique com betume modificado (M) e filer de cal hidráulica (H), com razão f/b de 1,5.

Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1,5 H 0,1 20 C 0,005	0,02	53,8	491,7	M 1,5 H 0,1 25 C 0,005	0,02	51,0	186,4
M 1,5 H 0,1 20 C 0,01	0,04	54,2	665,9	M 1,5 H 0,1 25 C 0,01	0,04	51,9	237,8
M 1,5 H 0,1 20 C 0,02	0,08	55,3	964,1	M 1,5 H 0,1 25 C 0,02	0,08	54,8	376,9
M 1,5 H 0,1 20 C 0,08	0,17	56,0	1702,8	M 1,5 H 0,1 25 C 0,08	0,17	56,3	744,6
M 1,5 H 0,1 20 T 0,005	0,02	54,8	372,0	M 1,5 H 0,1 25 T 0,005	0,02	51,7	150,8
M 1,5 H 0,1 20 T 0,01	0,04	55,4	543,7	M 1,5 H 0,1 25 T 0,01	0,04	51,1	211,4
M 1,5 H 0,1 20 T 0,02	0,08	56,3	794,8	M 1,5 H 0,1 25 T 0,02	0,08	52,4	305,6
M 1,5 H 0,1 20 T 0,08	0,17	57,8	1678,7	M 1,5 H 0,1 25 T 0,08	0,17	57,2	650,1
Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]	Provete	f [Hz]	Ângulo de fase [°]	Módulo complexo [kPa]
M 1,5 H 0,2 20 C 0,005	0,01	54,5	215,3	M 1,5 H 0,2 25 C 0,005	0,01	54,0	96,5
M 1,5 H 0,2 20 C 0,01	0,02	53,9	299,7	M 1,5 H 0,2 25 C 0,01	0,02	54,8	143,9
M 1,5 H 0,2 20 C 0,02	0,04	56,4	450,0	M 1,5 H 0,2 25 C 0,02	0,04	54,0	210,8
M 1,5 H 0,2 20 C 0,08	0,12	57,4	1012,2	M 1,5 H 0,2 25 C 0,08	0,12	57,2	523,8
M 1,5 H 0,2 20 T 0,005	0,01	55,7	163,4	M 1,5 H 0,2 25 T 0,005	0,01	53,6	88,9
M 1,5 H 0,2 20 T 0,01	0,02	55,0	251,1	M 1,5 H 0,2 25 T 0,01	0,02	54,4	143,4
M 1,5 H 0,2 20 T 0,02	0,04	57,1	410,2	M 1,5 H 0,2 25 T 0,02	0,04	57,0	204,2
M 1,5 H 0,2 20 T 0,08	0,12	58,4	919,5	M 1,5 H 0,2 25 T 0,08	0,12	58,1	434,4

Anexo F – Influência da amplitude de deformação imposta em mastiques ensaiados a 20°C e 25°C, em ensaios de cíclicos uniaxiais de compressão simples

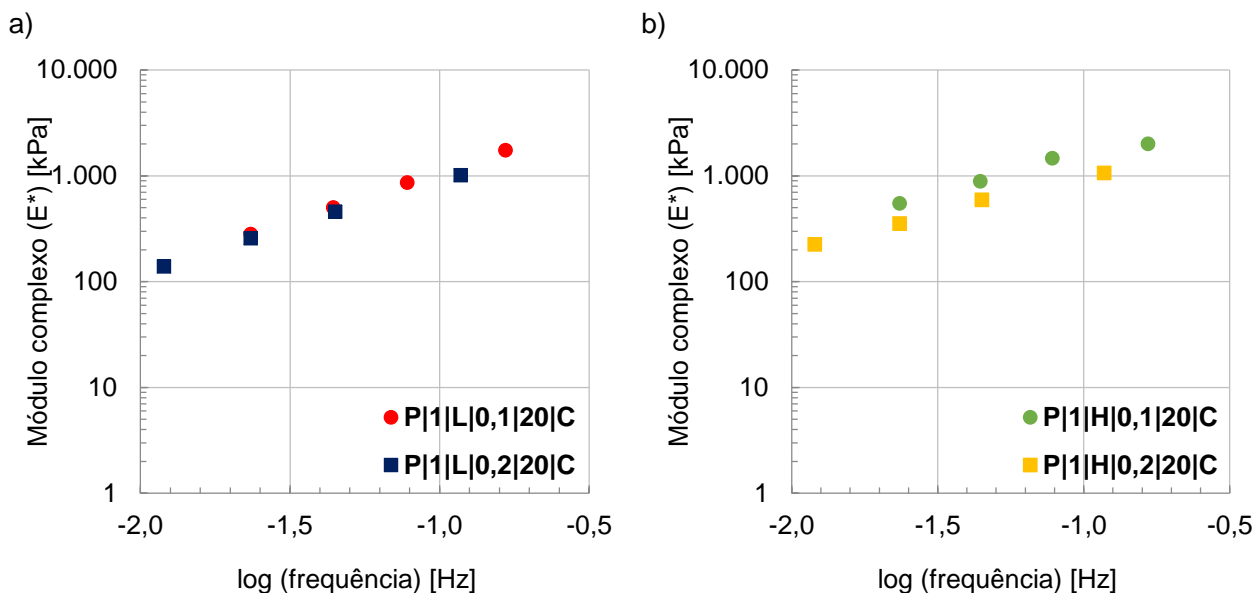


Figura F.1 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 20°C, com razão f/b de 1 e: a) pó de calcário (L) e b) filer de cal hidráulica (H).

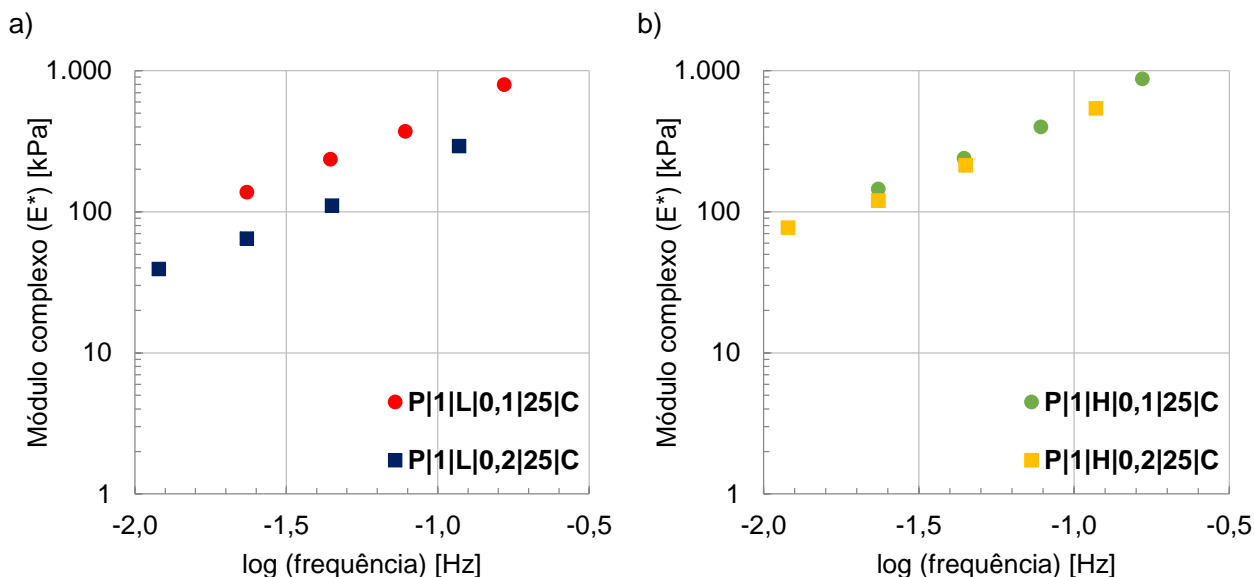


Figura F.2 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 25°C, com razão f/b de 1e: a) pó de calcário (L) e b) filer de cal hidráulica (H).

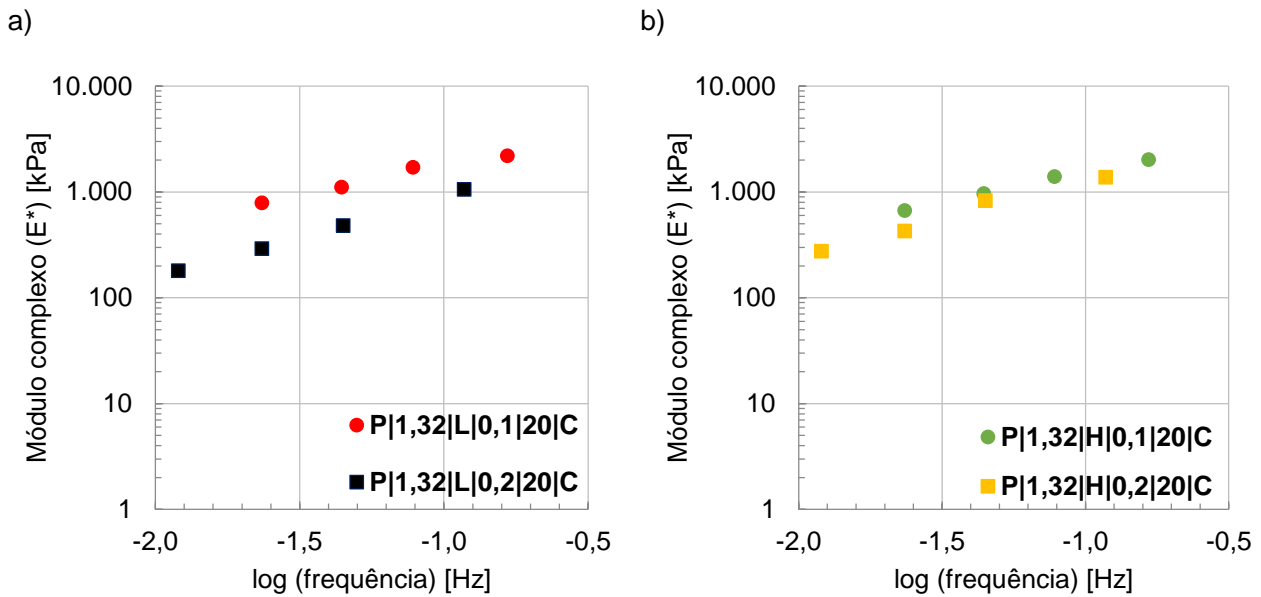


Figura F.3 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 20°C, com razão f/b de 1,32 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).

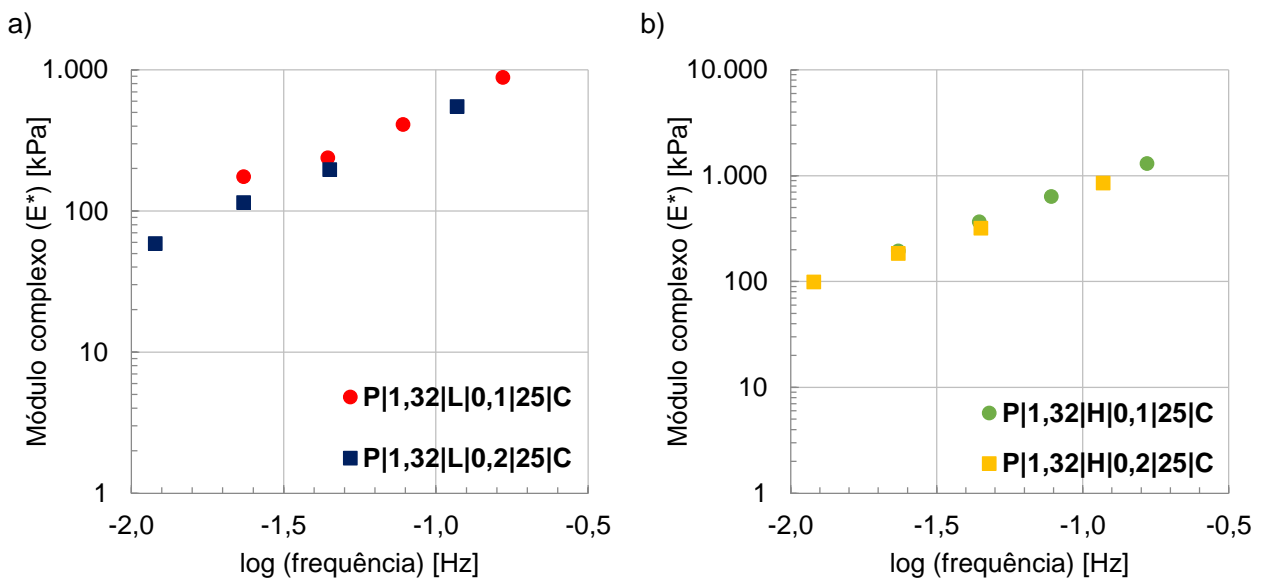


Figura F.4 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume puro (P), a 25°C, com razão f/b de 1,32 e: a) pó de calcário (L) e b) fíler de cal hidráulica (H).

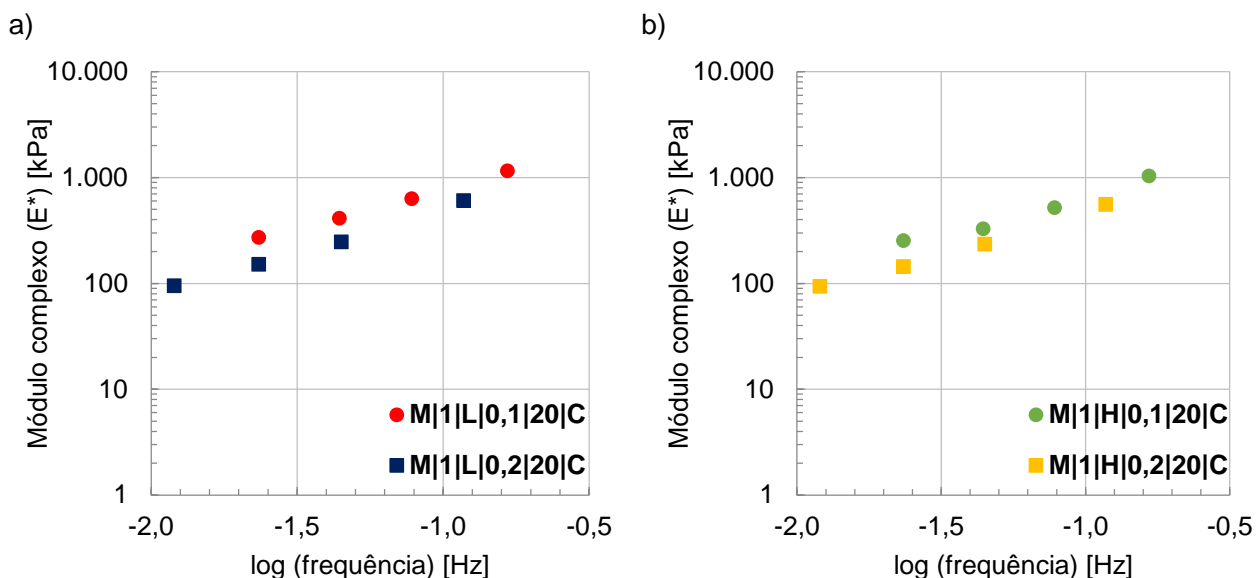


Figura F.5 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 20°C, com razão f/b de 1 e: a) pó de calcário (L) e b) filer de cal hidráulica (H).

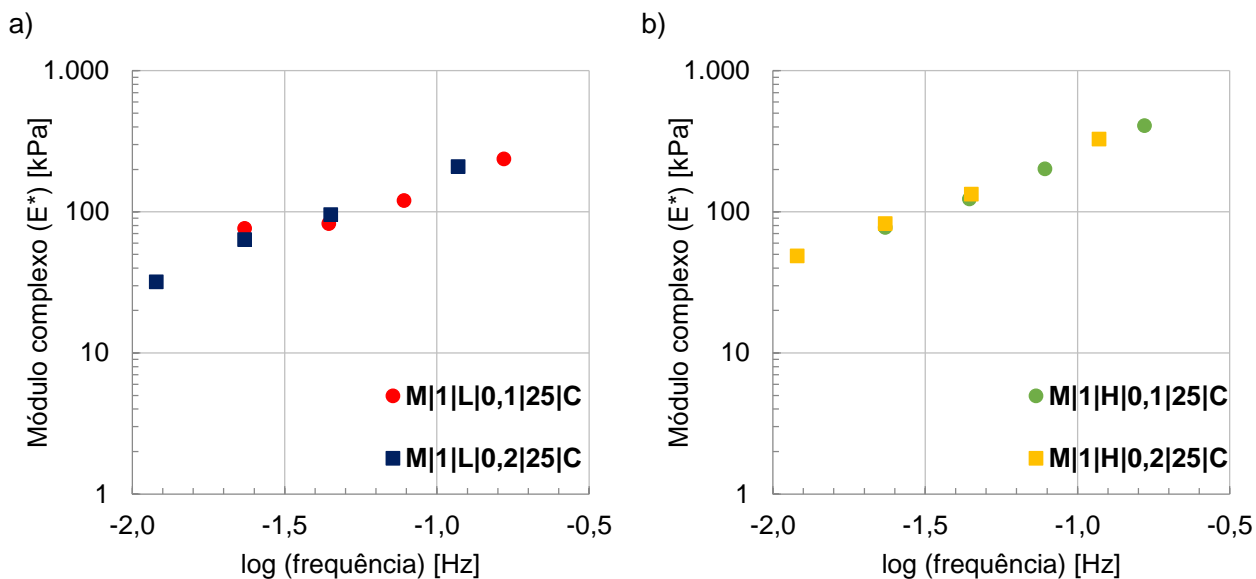


Figura F.6 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 25°C, com razão f/b de 1 e: a) pó de calcário (L) e b) filer de cal hidráulica (H).

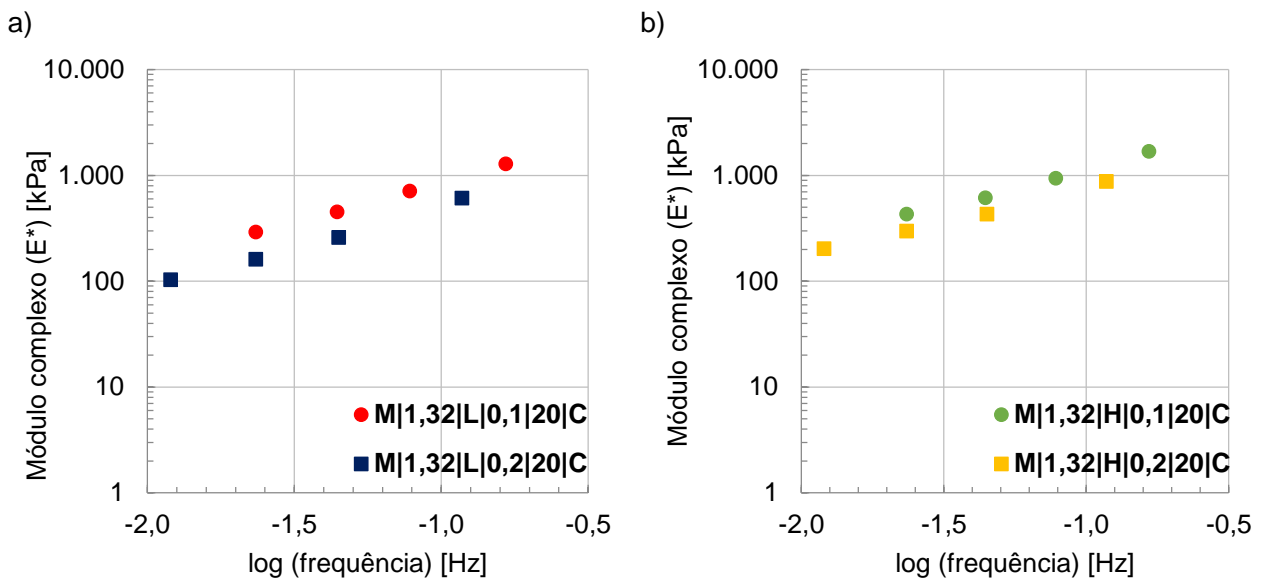


Figura F.7 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 20°C, com razão f/b de 1,32 e: a) pó de calcário (L) e b) filer de cal hidráulica (H).

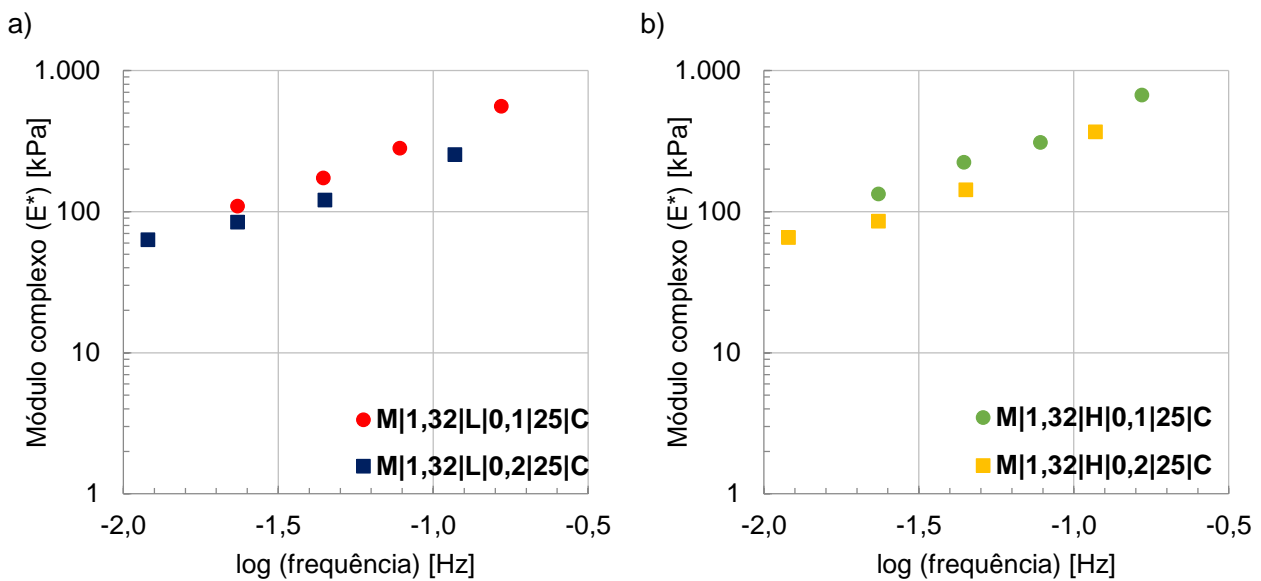


Figura F.8 – Influência da amplitude de deformação imposta no valor do módulo complexo nos mastiques com betume modificado (M), a 25°C, com razão f/b de 1,32 e: a) pó de calcário (L) e b) filer de cal hidráulica (H).

Anexo G – Isócronas do módulo complexo e ângulo de fase de mastiques à frequência de 0,1 Hz

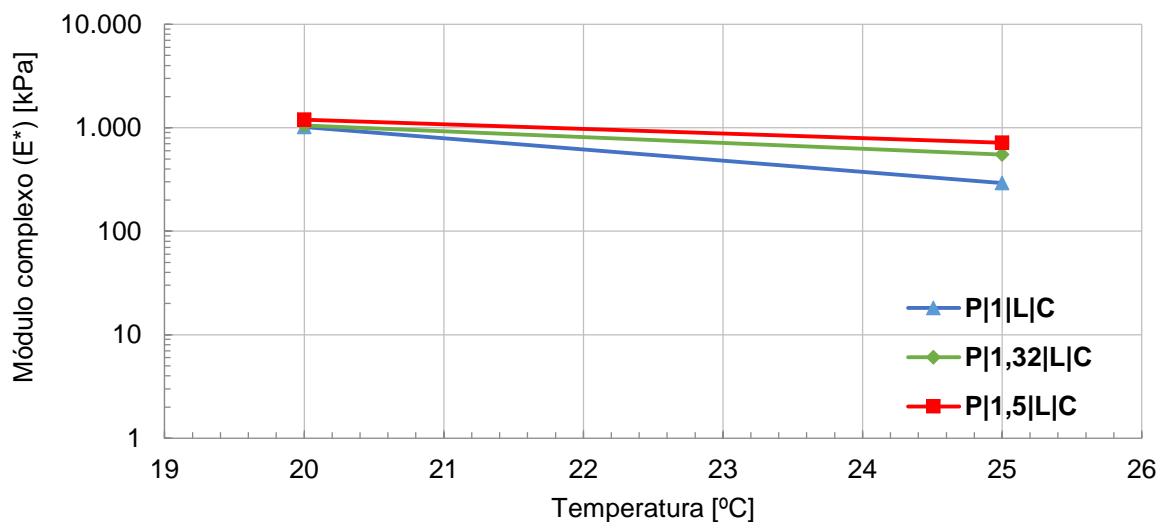


Figura G.1 – Isócronas do módulo complexo a 0,1 Hz para os mastiques, com betume puro (P) e pó de calcário (L).

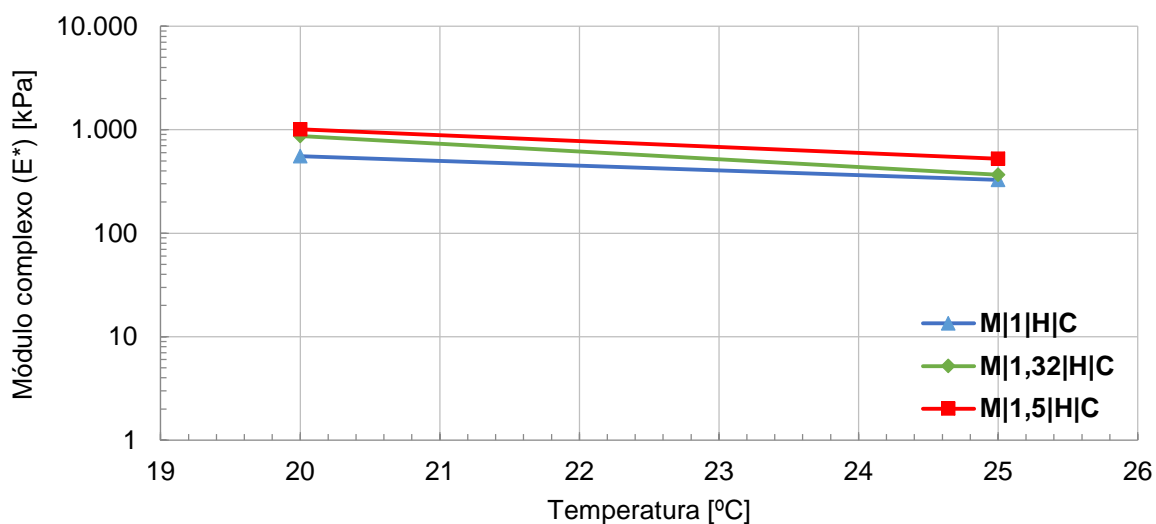


Figura G.2 – Isócronas do módulo complexo a 0,1 Hz para os mastiques, com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H).

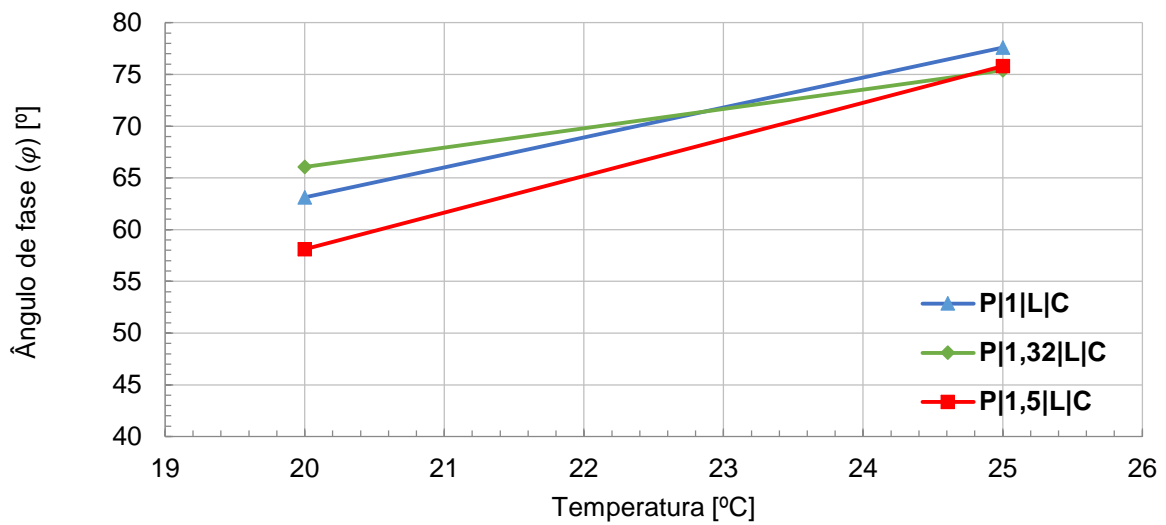


Figura G.3 – Isócronas do ângulo de fase a 0,1 Hz para os mastiques, com betume puro (P) e pó de calcário (L).

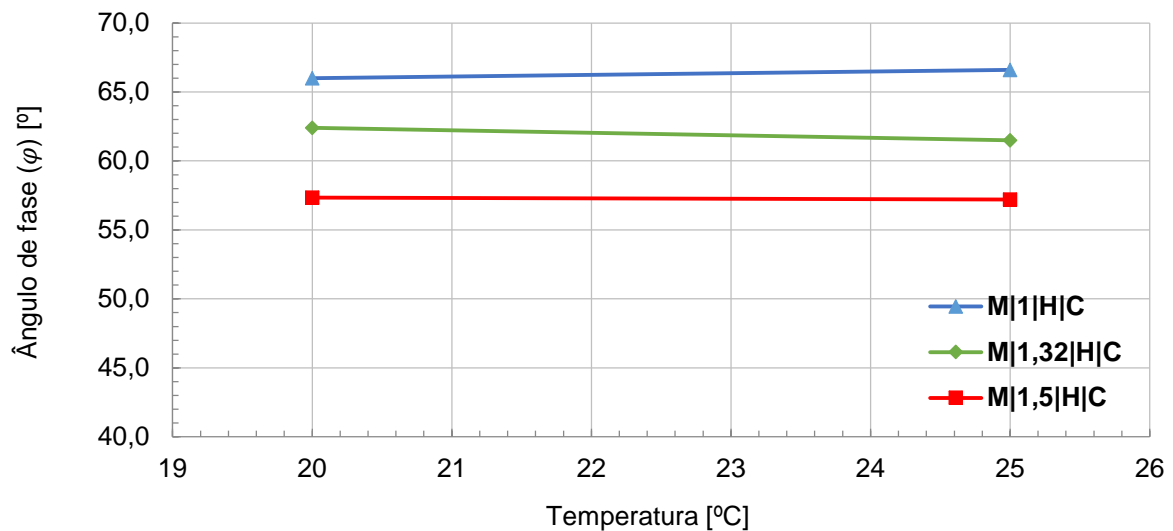


Figura G.4 – Isócronas do ângulo de fase a 0,1 Hz para os mastiques, com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H).

Anexo H – Isotérmicas do módulo complexo e do ângulo de fase de diferentes mastiques à temperatura de 25°C

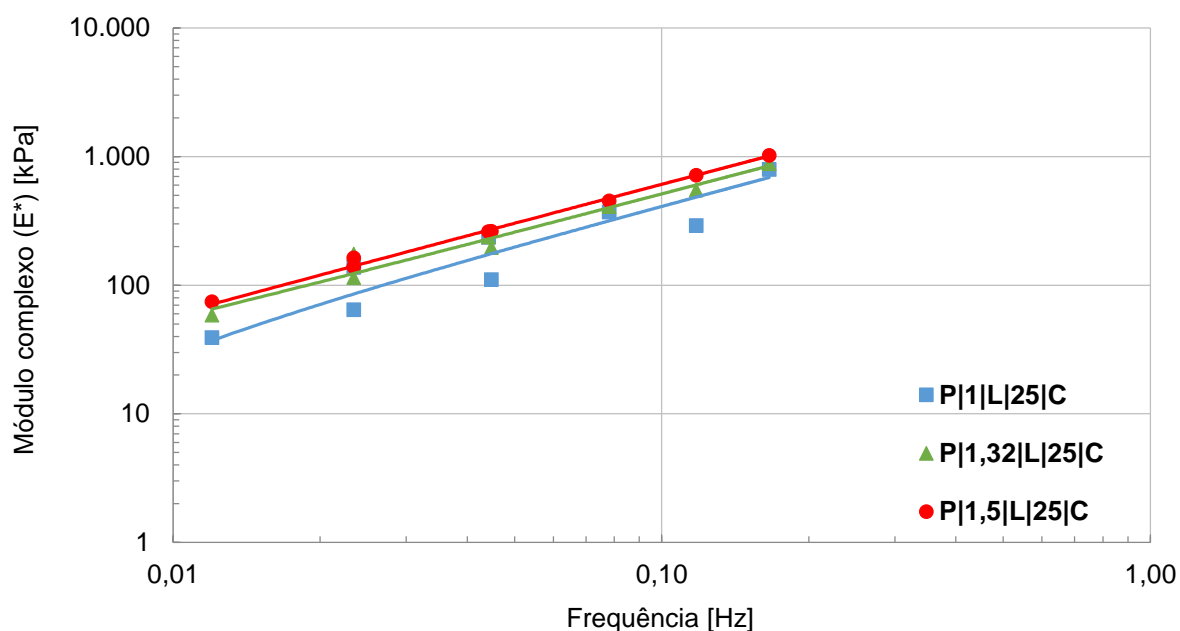


Figura H.1 - Isotérmicas do módulo complexo para os mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L), a 25°C.

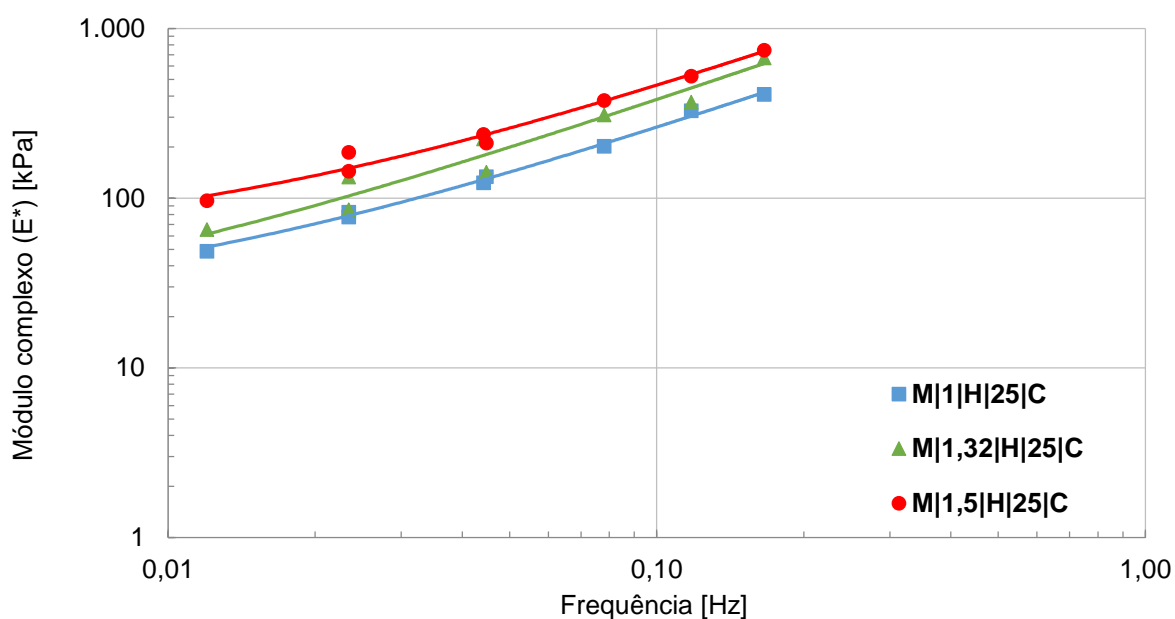


Figura H.2 - Isotérmicas do módulo complexo para os mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), a 25°C.

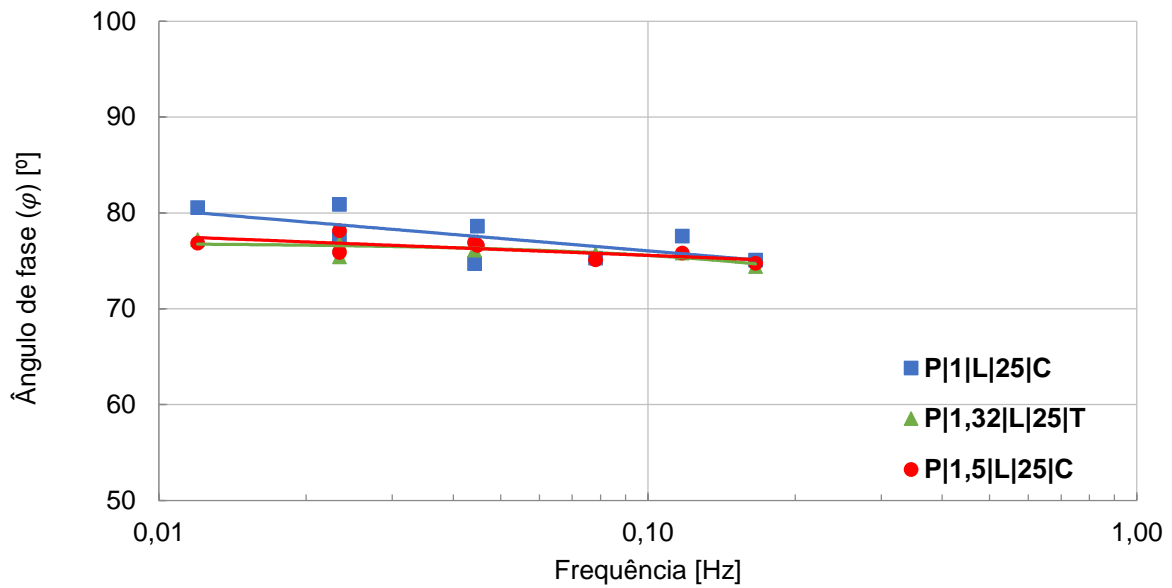


Figura H.3 - Isotérmicas do ângulo de fase para os mastiques com betume puro (P) e pó de calcário (L), a 25°C.

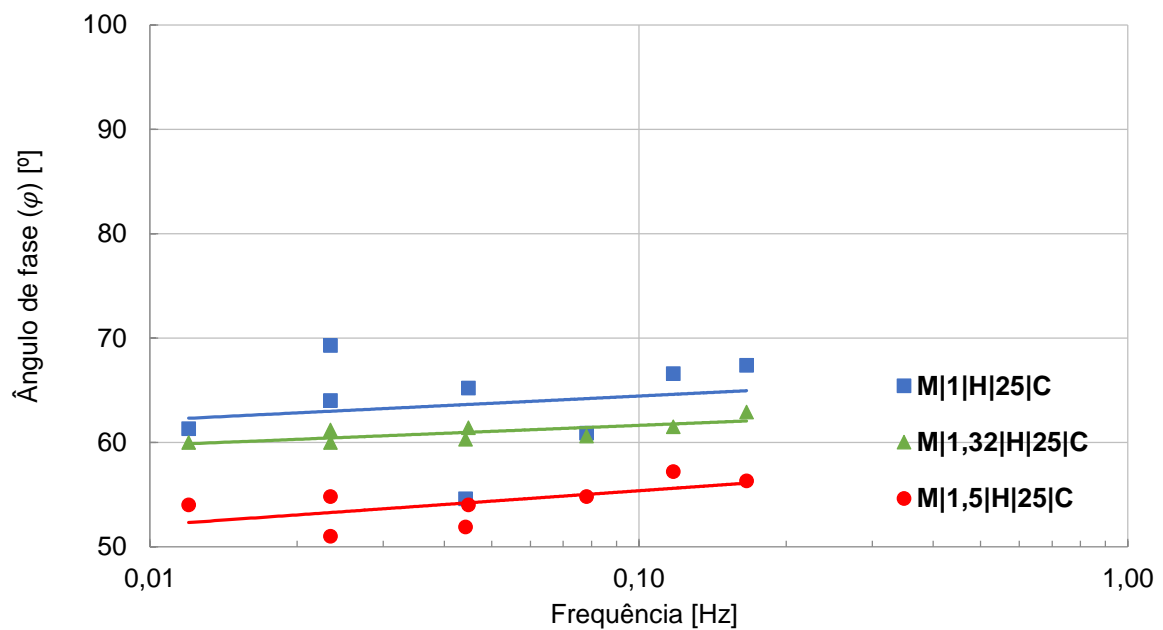


Figura H.4 - Isotérmicas do ângulo de fase para os mastiques com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H), a 25°C.

Anexo I – Curvas-mestras do módulo complexo e do ângulo de fase de diferentes mastiques com temperatura de referência de 25°C

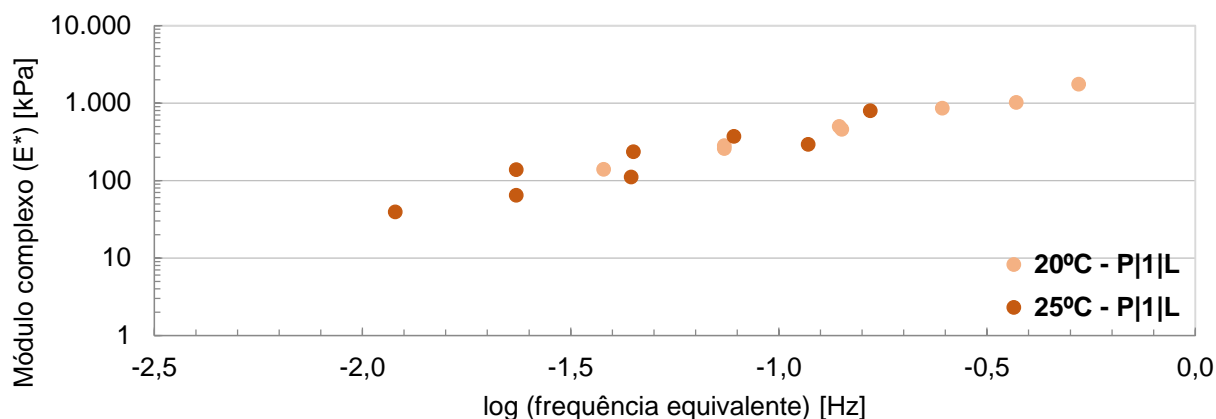


Figura I.1– Curvas-mestra do módulo complexo do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1.

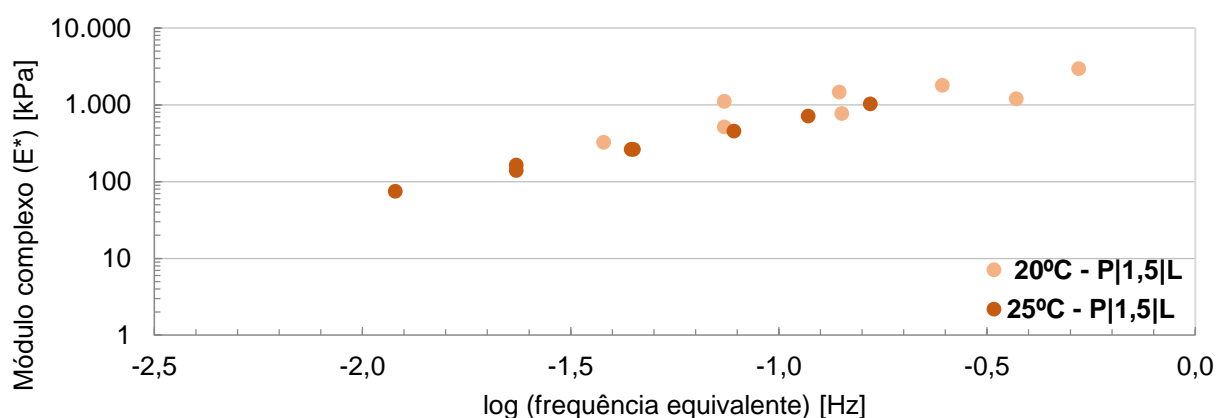


Figura I.2 – Curvas-mestra do módulo complexo do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,5.

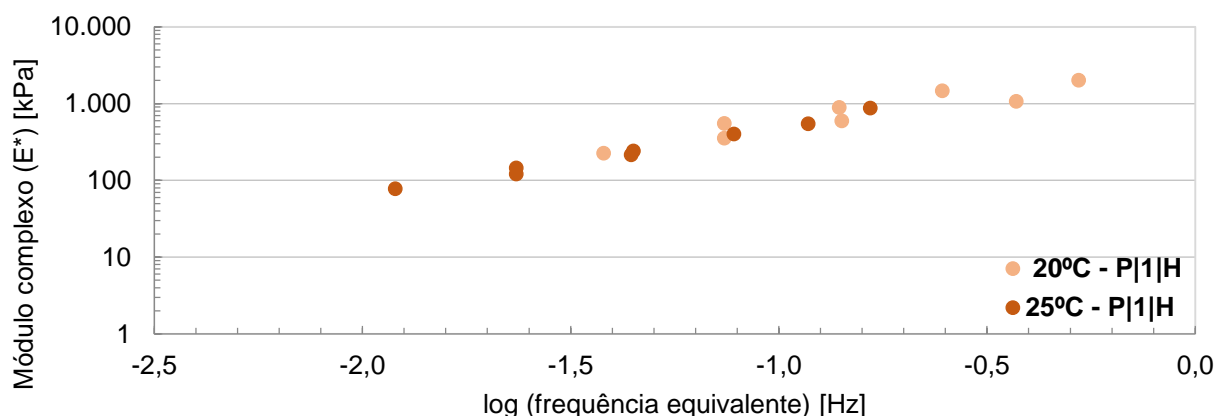


Figura I.3– Curvas-mestra do módulo complexo do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1.

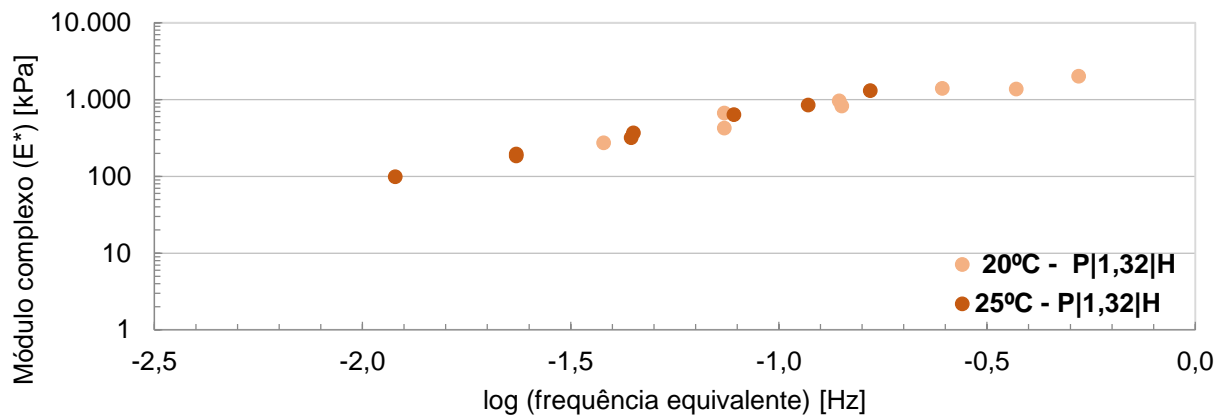


Figura I.4– Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,32.

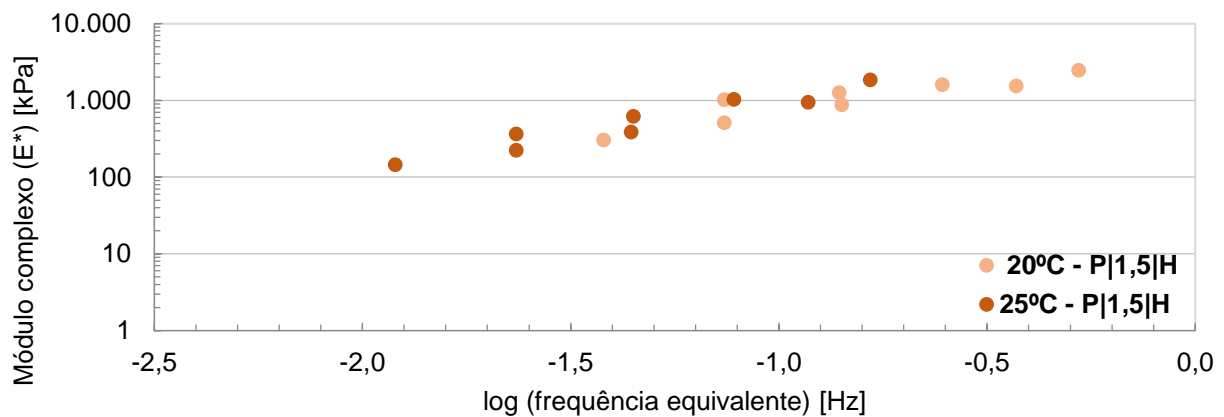


Figura I.5 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,5.

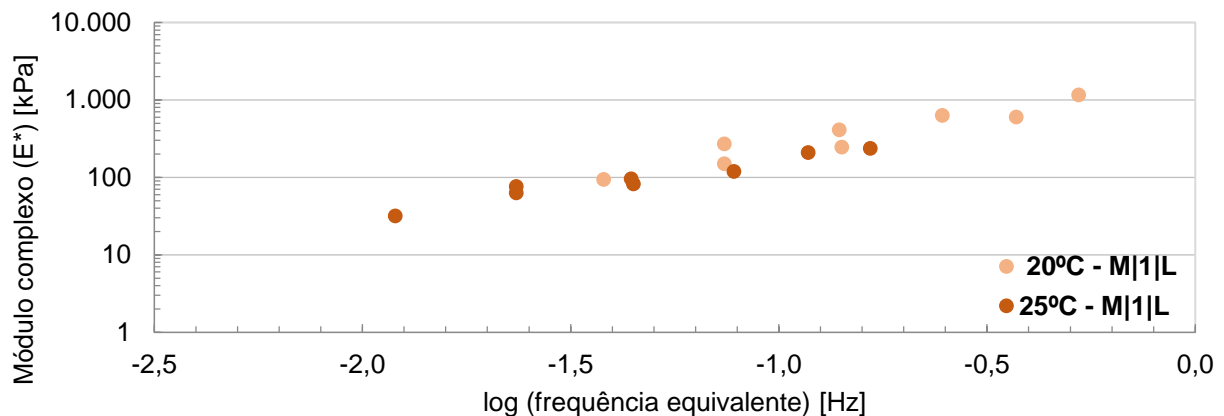


Figura I.6– Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1.

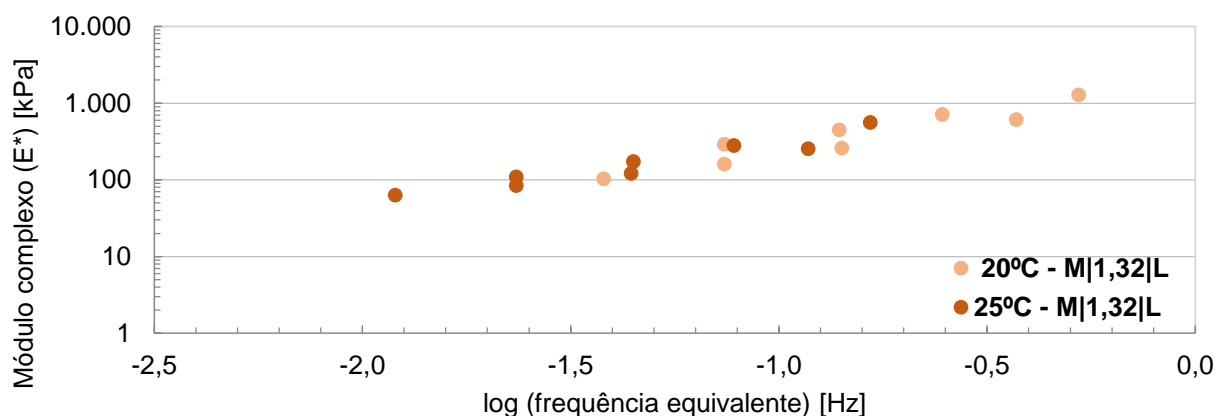


Figura I.7 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,32.

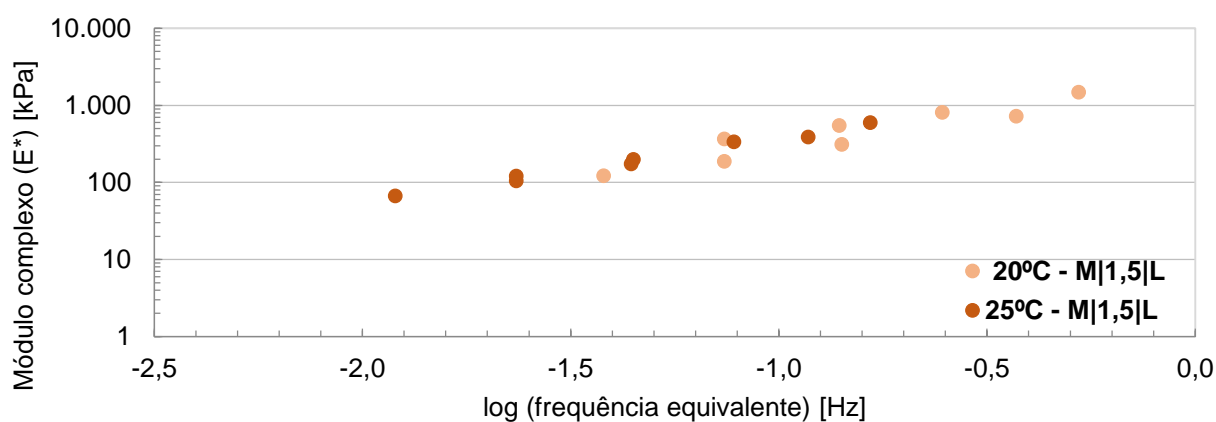


Figura I.8 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,5.

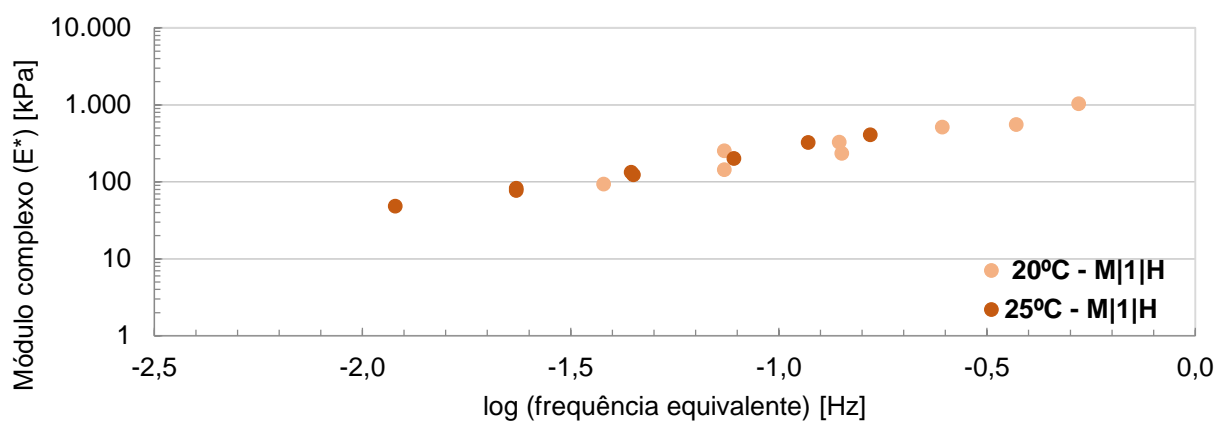


Figura I.9 – Curvas-mestra do módulo complexo do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), filer de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1.

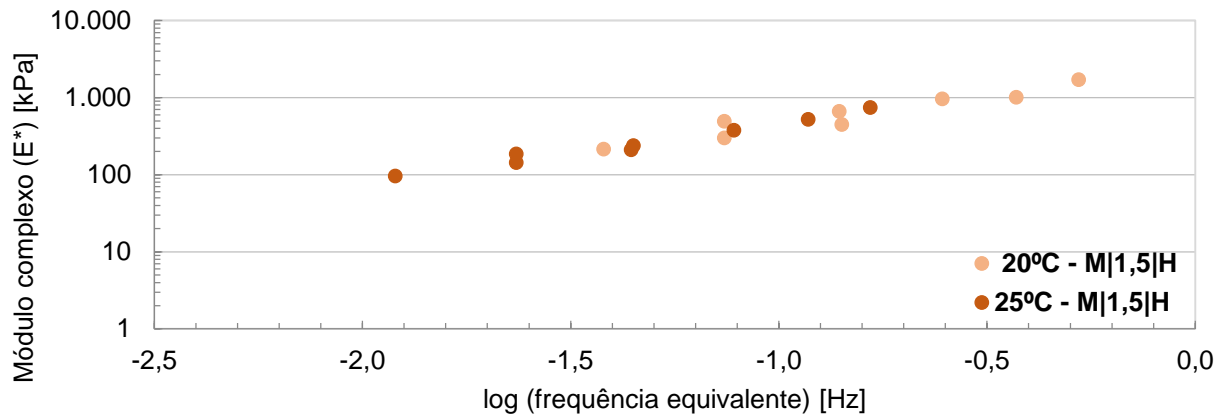


Figura I.10 – Curvas-mestra do módulo complexo do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), fíler de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,5.

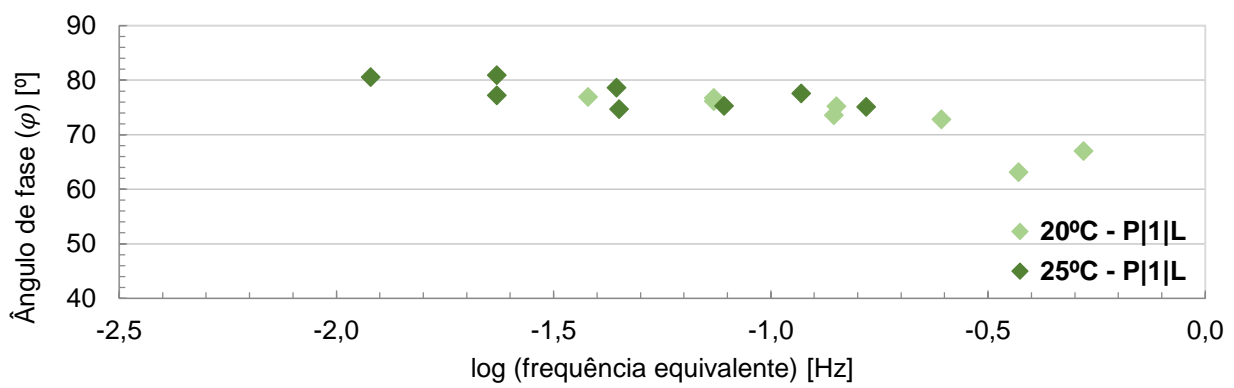


Figura I.11– Curvas-mestras do ângulo de fase do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1.

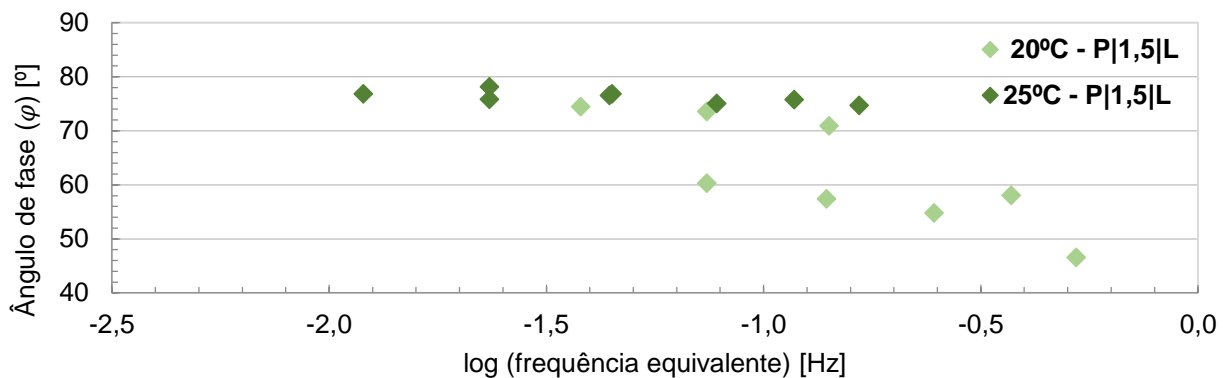


Figura I.12 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,5.

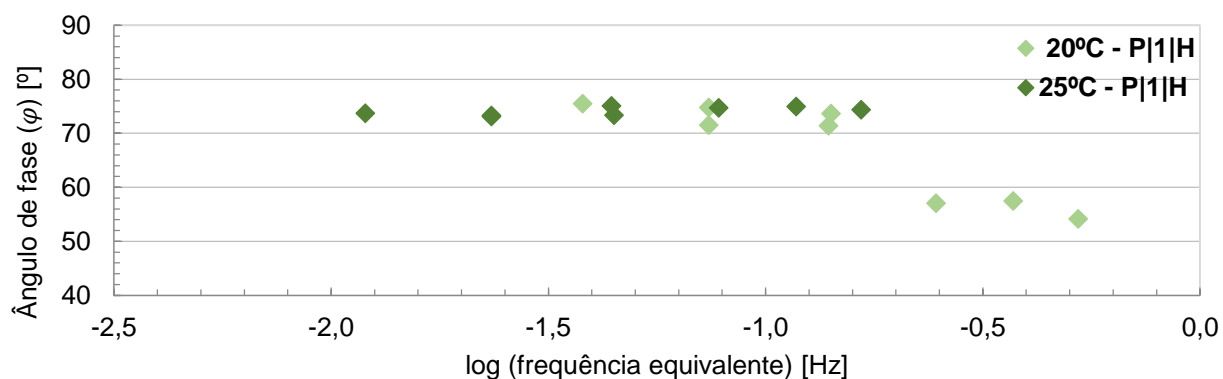


Figura I.13 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), filer de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1.

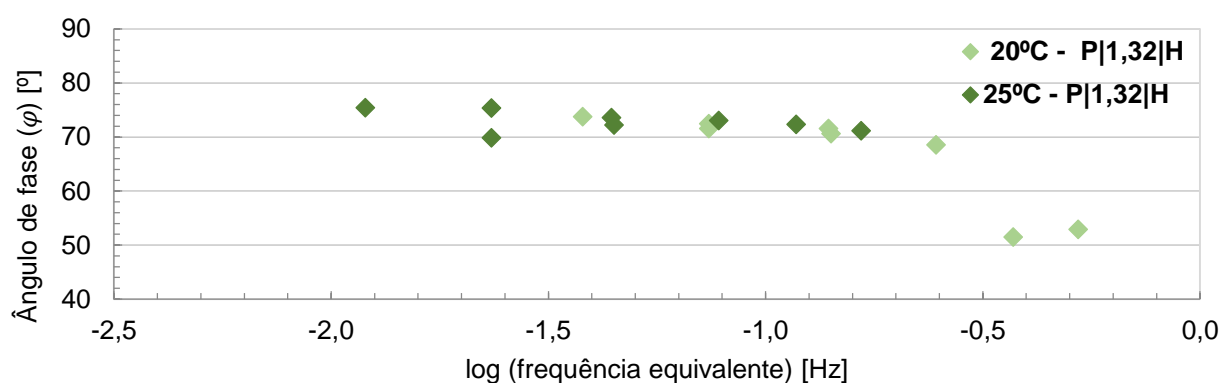


Figura I.14 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), filer de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,32.

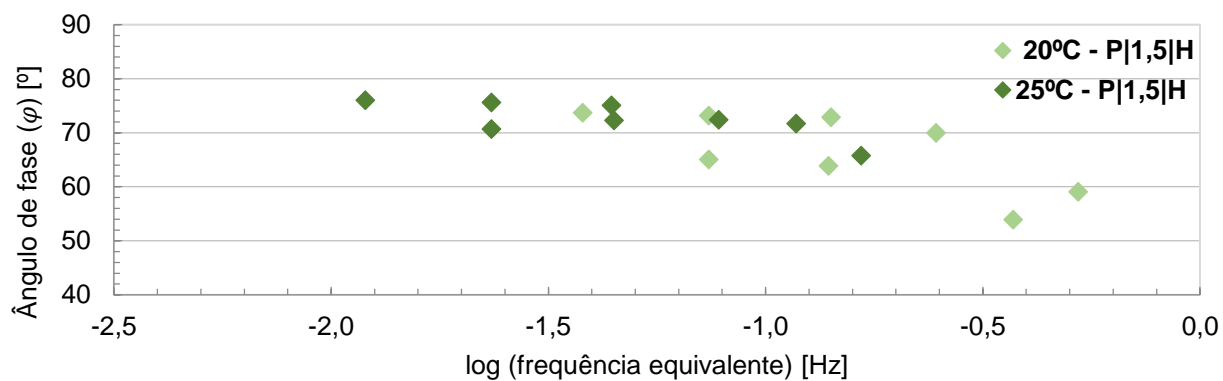


Figura I.15 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume puro (P), filer de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,5.

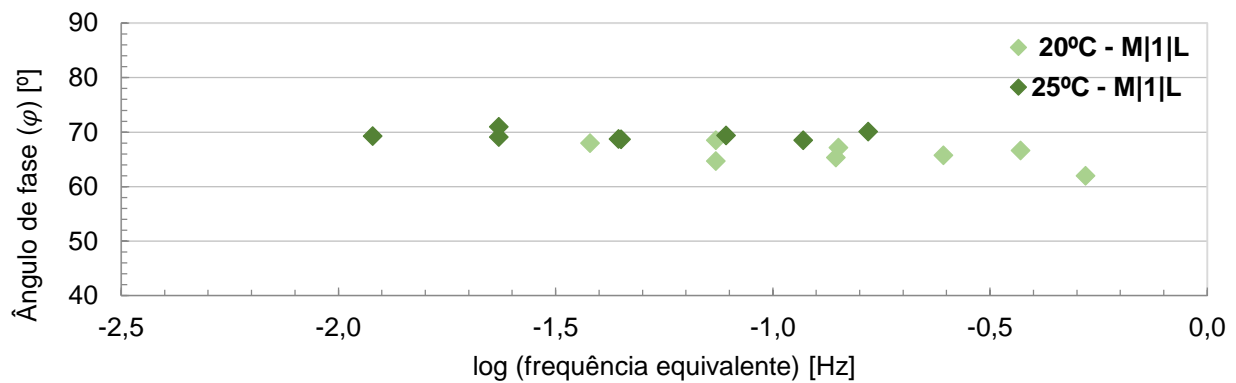


Figura I.16 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1.

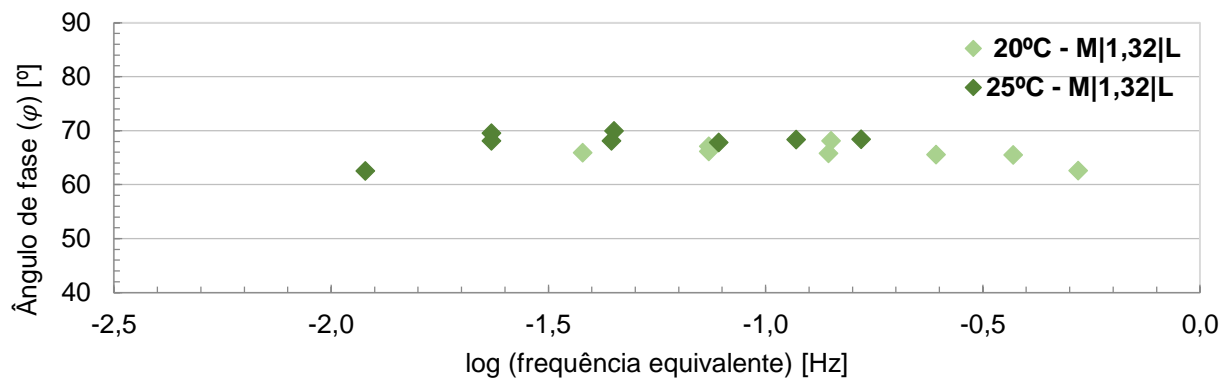


Figura I.17 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,32.

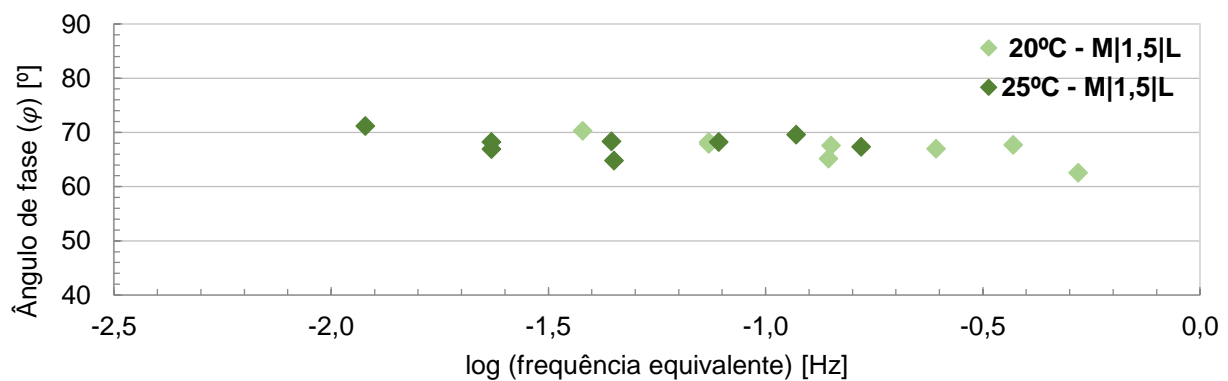


Figura I.18 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mástico betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), pó de calcário (L) e com razão f/b de 1,5.

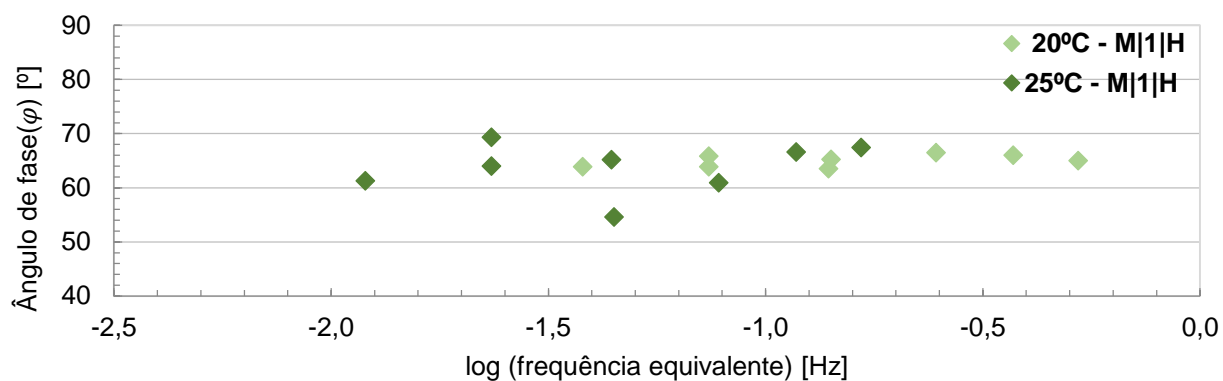


Figura I.19 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), filer de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1.

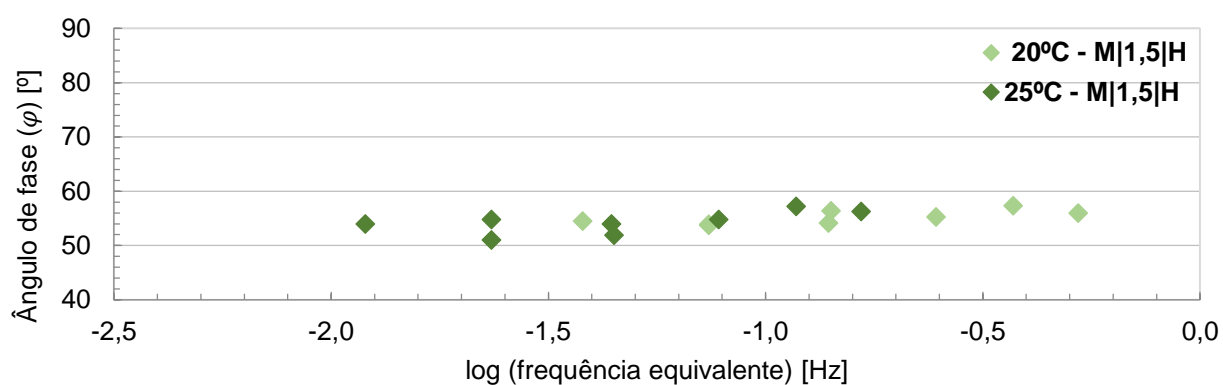


Figura I.20 – Curvas-mestras do ângulo de fase do mastique betuminoso para uma temperatura de referência de 25°C, com betume modificado (M), filer de cal hidráulica (H) e com razão f/b de 1,5.

Anexo J – Curvas-mestras do ajustamento do modelo 2S2P1D aos resultados experimentais para o módulo complexo e ângulo de fase de diferentes mastiques com temperatura de referência de 25°C

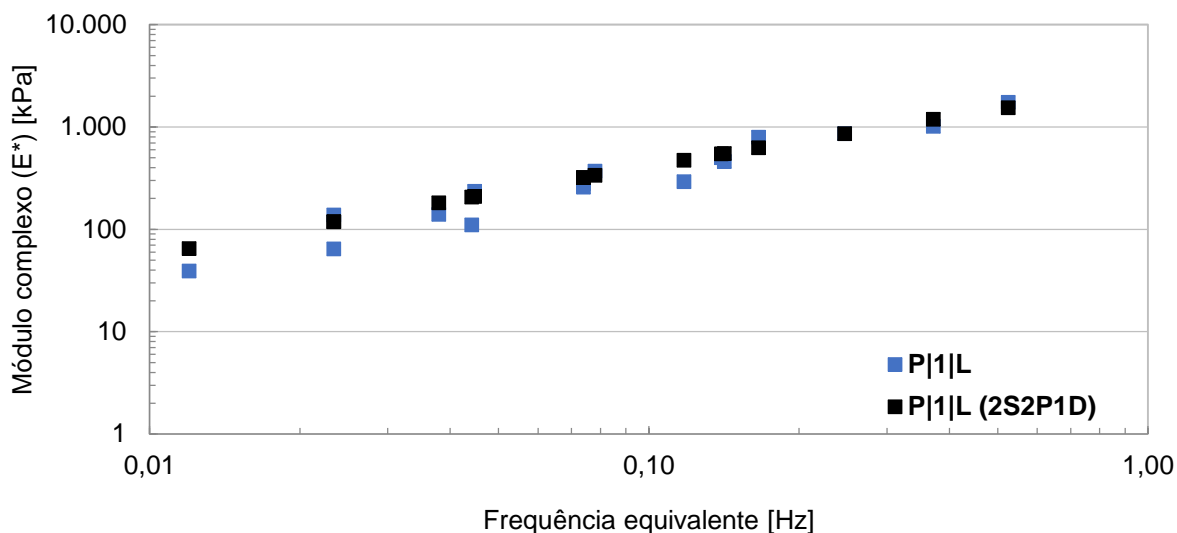


Figura J.1 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mastique com betume puro (P) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.

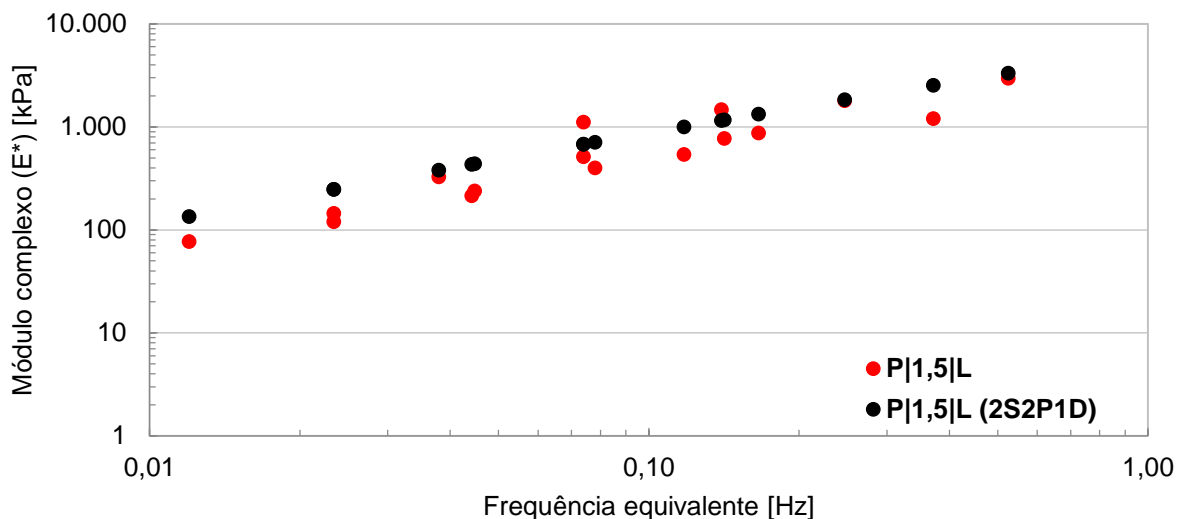


Figura J.2 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mastique com betume puro (P) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.

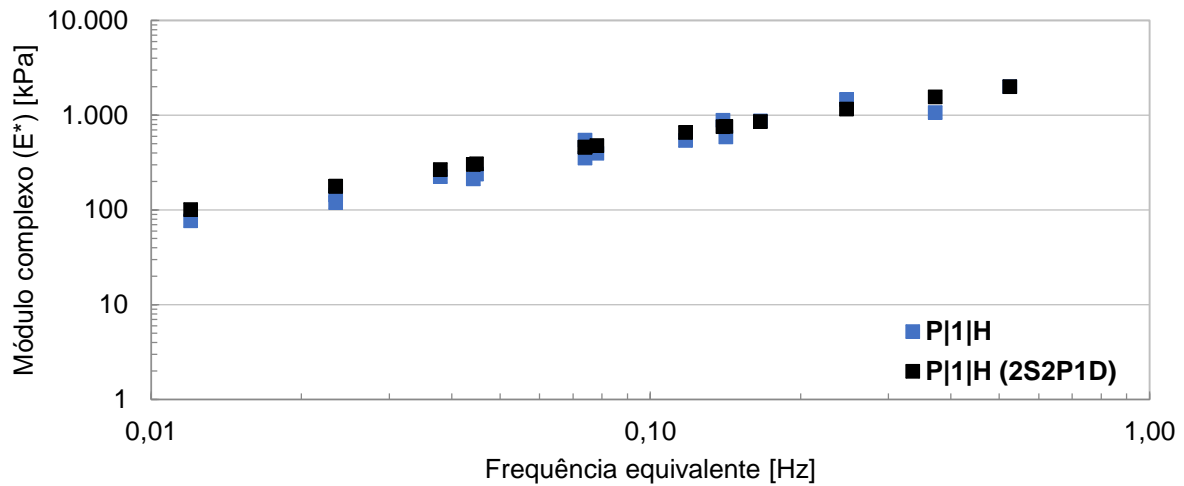


Figura J.3 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume puro (P) e filler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.

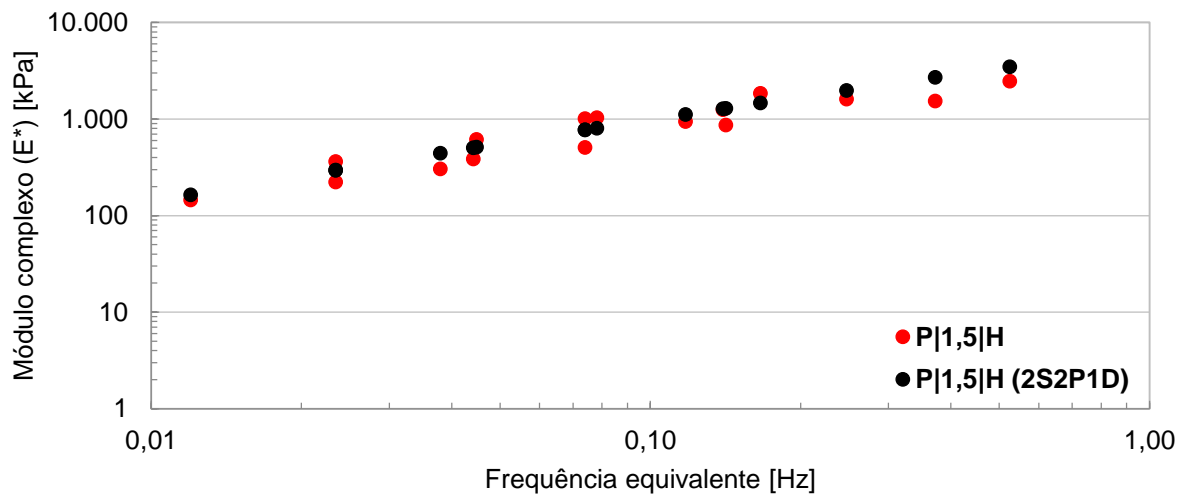


Figura J.4 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume puro (P) e filler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.

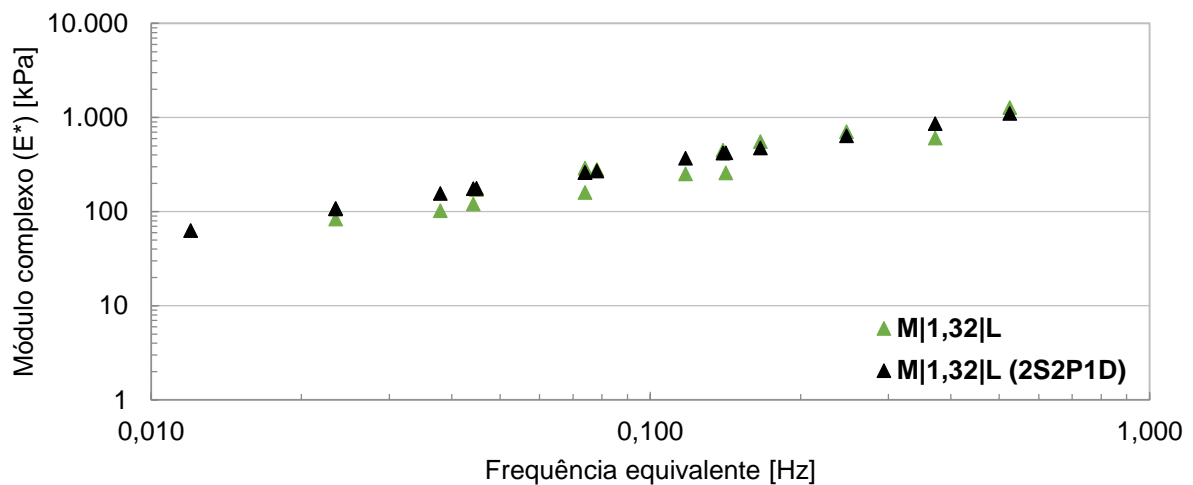


Figura J.5 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

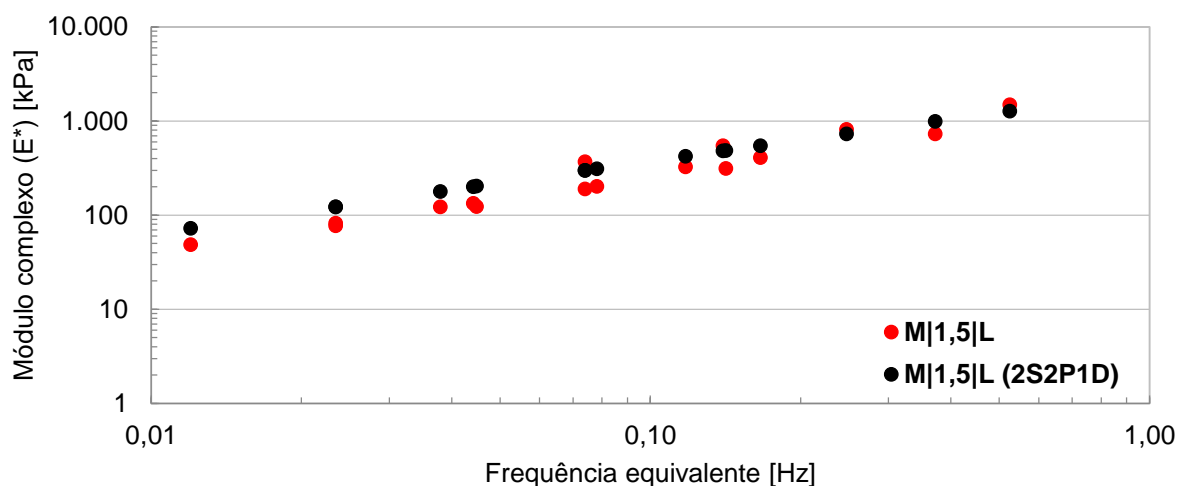


Figura J.6 – Curvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.

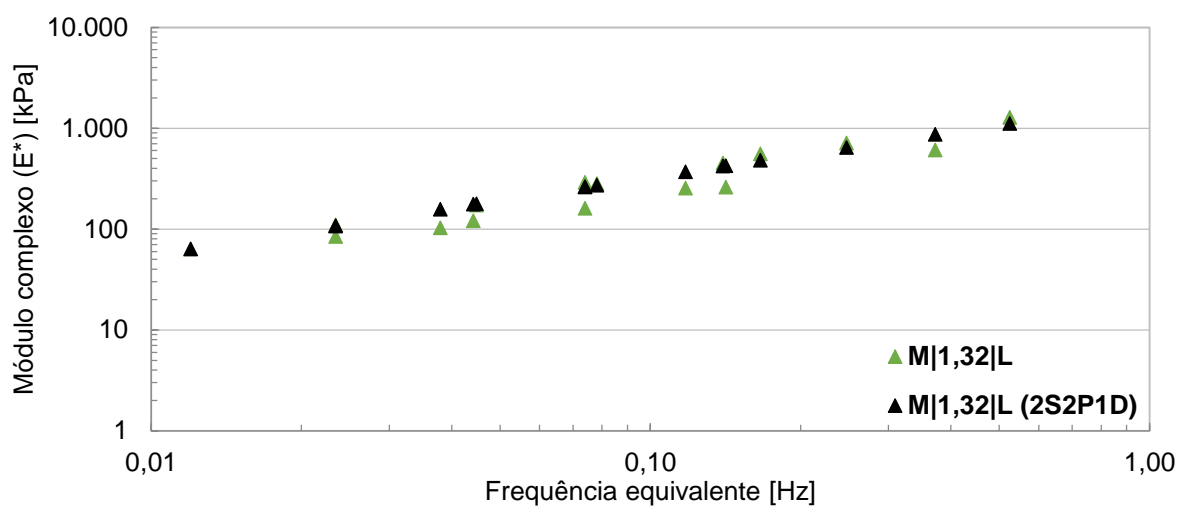


Figura J.7 – Curvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

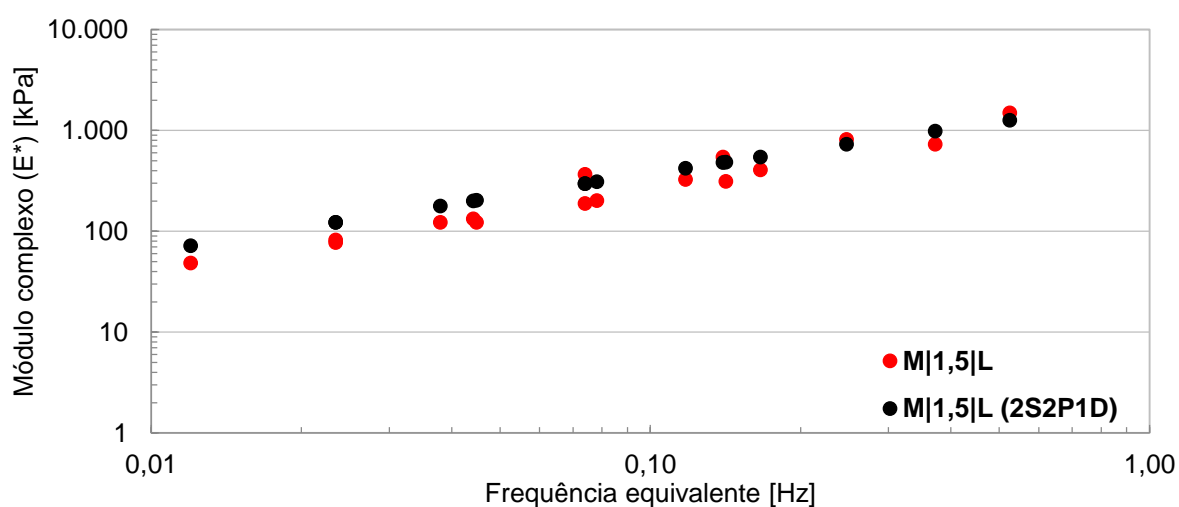


Figura J.8 – Curvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.

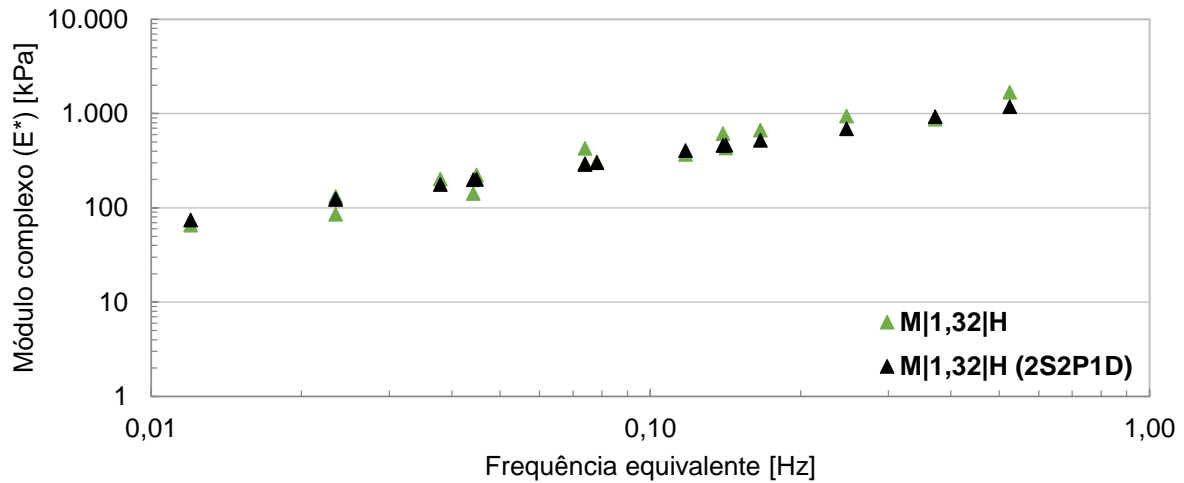


Figura J.9 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

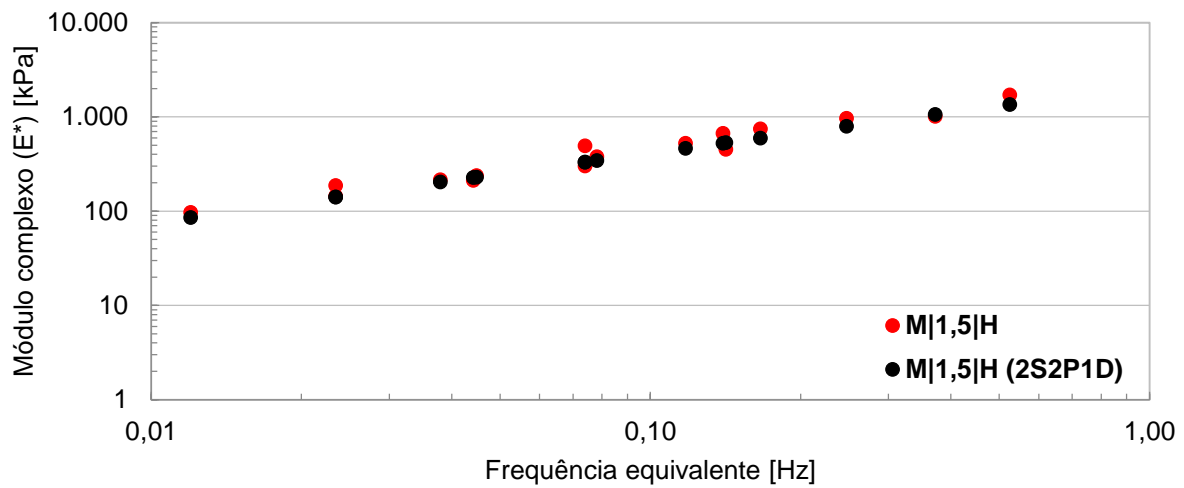


Figura J.10 – Cuvas-mestras do módulo complexo de um mástico com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.

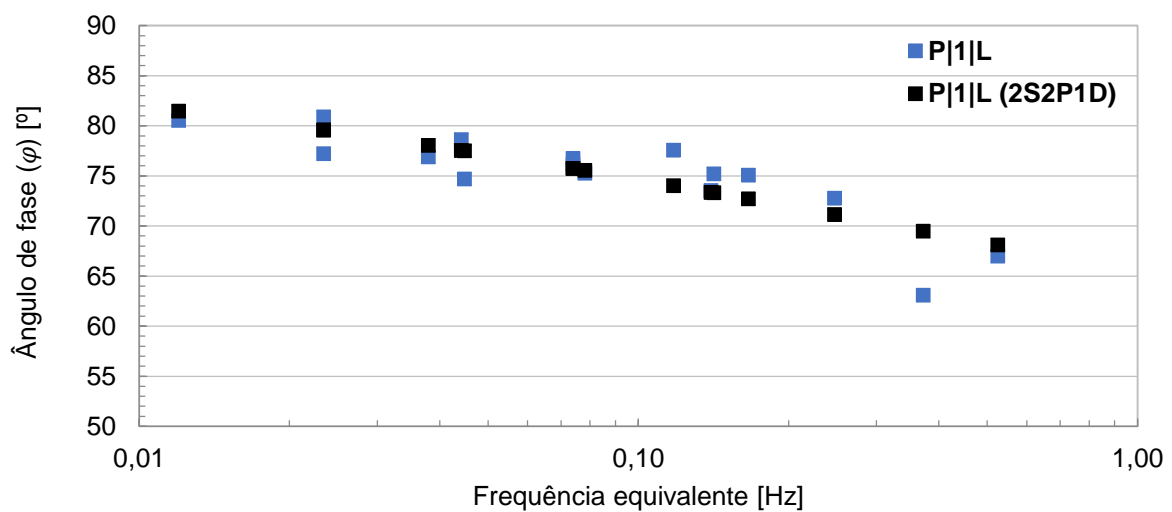


Figura J.11 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mástico com betume puro (P) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.

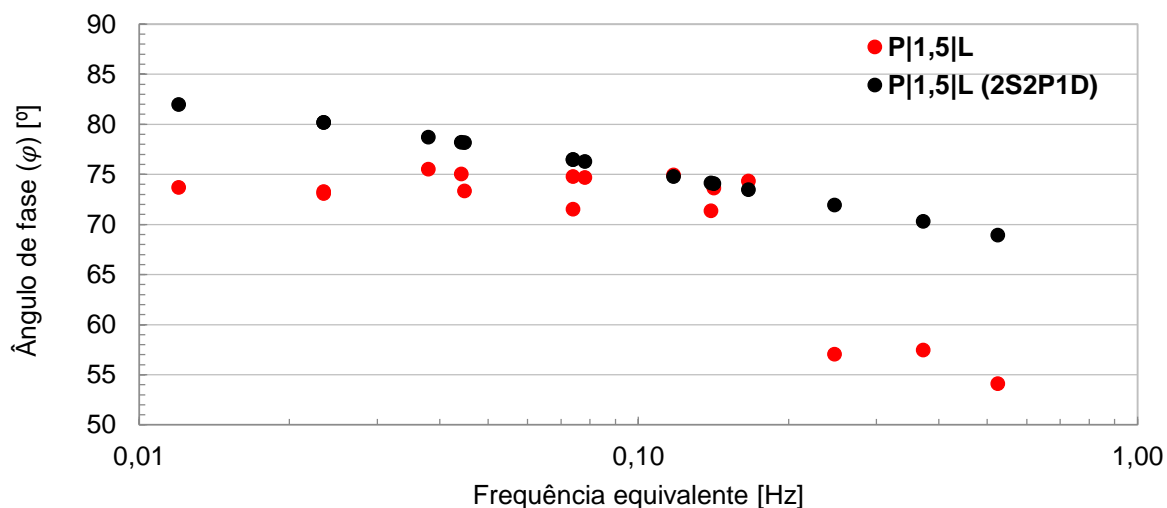


Figura J.12 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume puro (P) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.

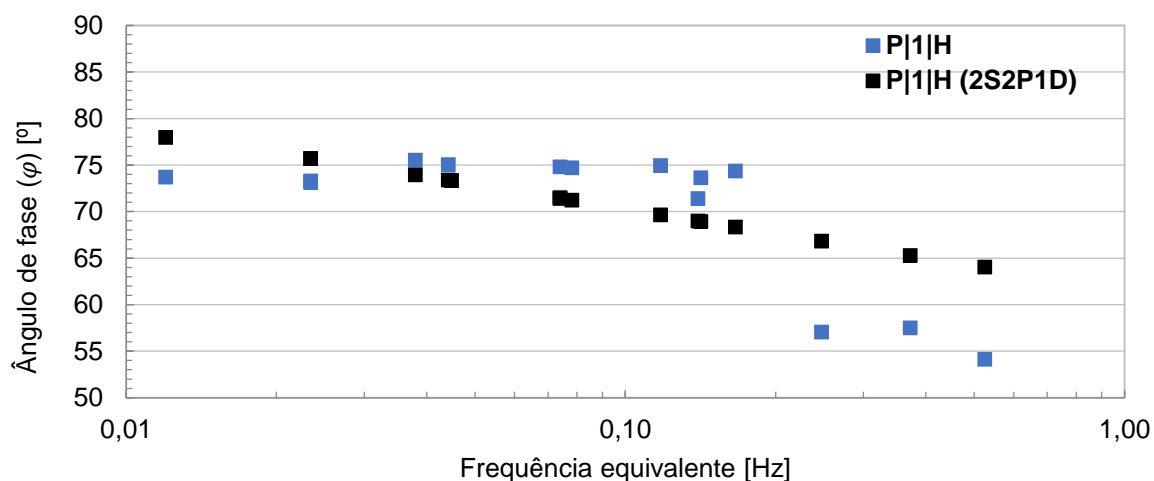


Figura J.13 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1.

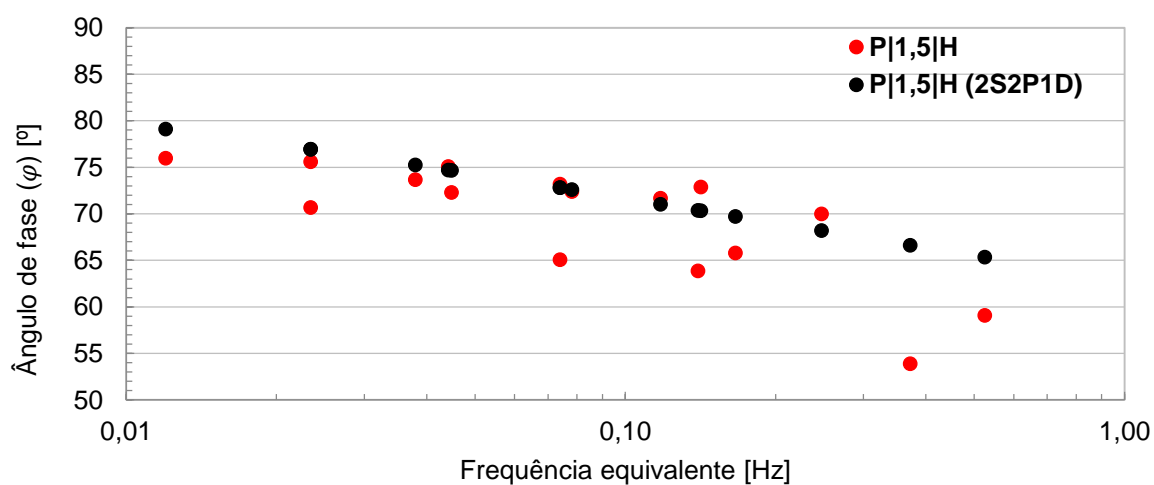


Figura J.14 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume puro (P) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.

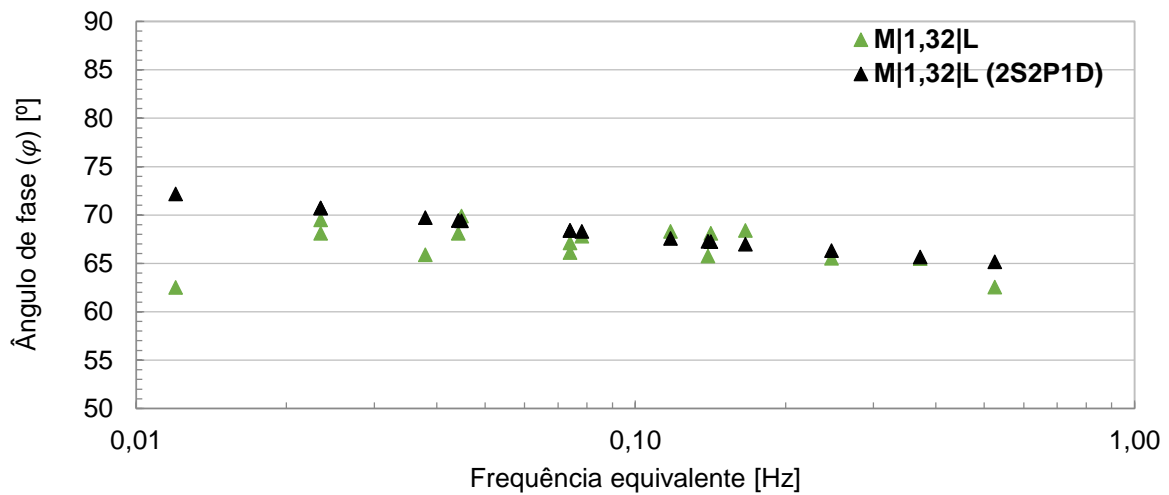


Figura J.15 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

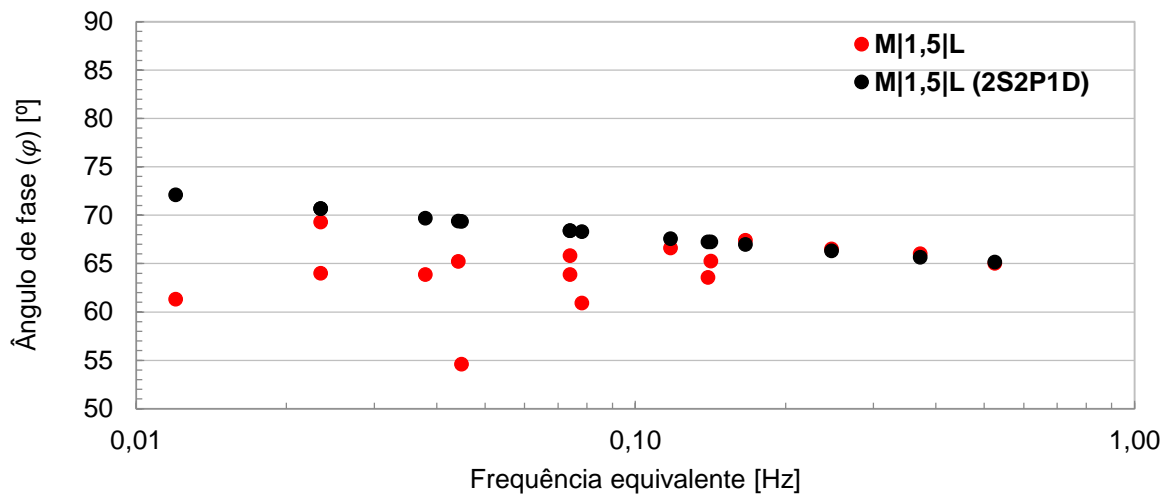


Figura J.16 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume modificado (M) e pó de calcário (L) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.

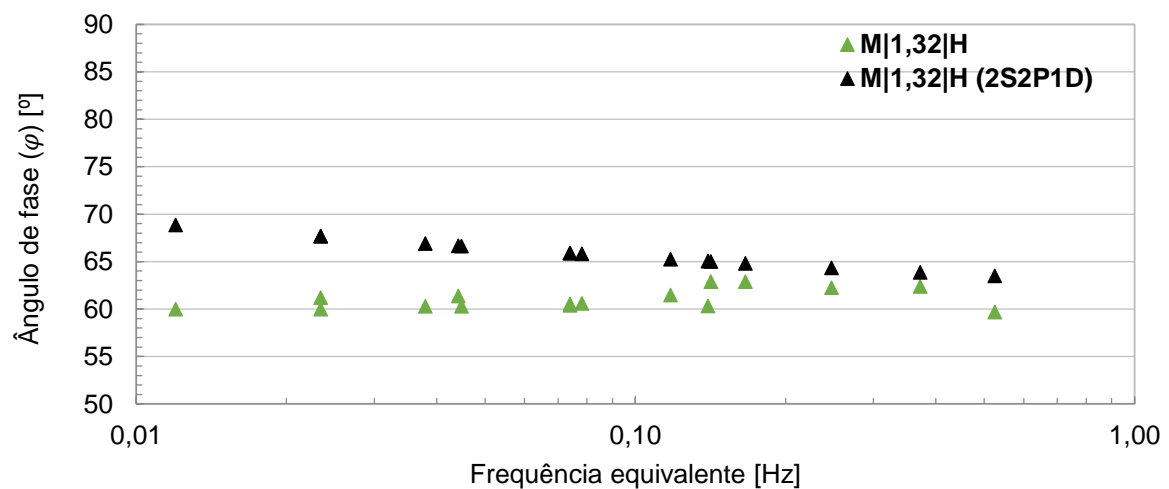


Figura J.17 – Cuvas-mestras do ângulo de fase de um mastique com betume modificado (M) e filer de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,32.

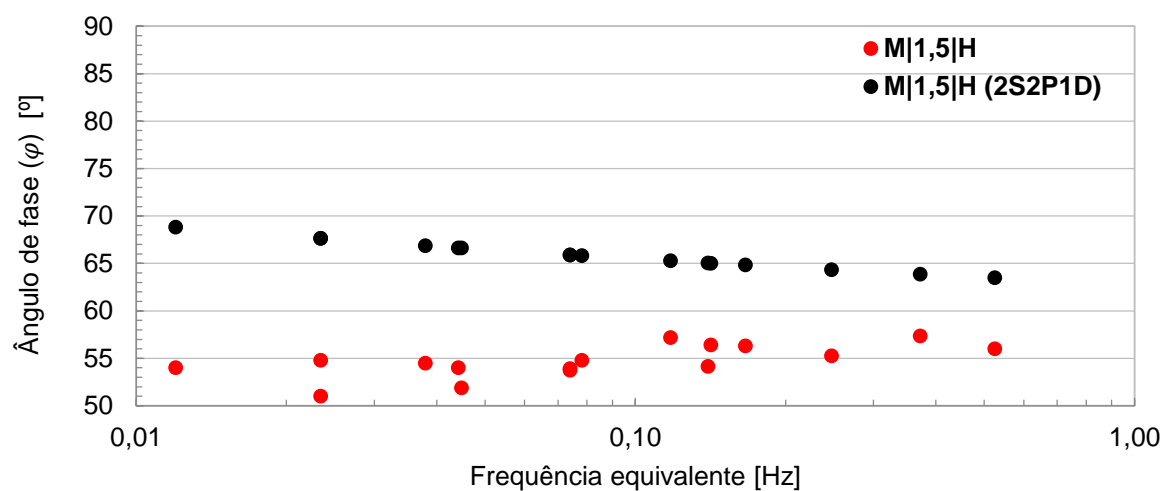


Figura J.18 – Curvas-mestras do ângulo de fase de um mástico com betume modificado (M) e fíler de cal hidráulica (H) a uma T_{ref} 25°C, com uma razão f/b de 1,5.